

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Anisotropia em TDEM:

Estudos Sintéticos

Dissertação

Susana Ferreira Duarte dos Santos Gonçalves

Mestrado em Ciências Geofísicas

Especialização em Geofísica Interna

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Anisotropia em TDEM:

Estudos Sintéticos

Dissertação

Susana Ferreira Duarte dos Santos Gonçalves

Mestrado em Ciências Geofísicas

Especialização em Geofísica Interna

Trabalho de Projecto orientado pelo Prof. Doutor Fernando Acácio Monteiro dos Santos

2012

“O valor das coisas
não está no tempo
que elas duram,
mas na intensidade
com que acontecem.

Por isso existem
momentos inesquecíveis,
coisas inexplicáveis
e pessoas incomparáveis. “

(Fernando Pessoa)

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Doutor Fernando dos Santos pela oportunidade e disponibilidade que teve na orientação deste trabalho. Sempre que necessário, esteve disponível para ajudar, sem nunca perder a preocupação de transmitir conhecimento, garantindo assim, que os seus alunos acabem os projectos a saber mais do que quando os começaram.

Professora Fátima, de todos os professores que tive até aqui, cada um com a sua importância neste percurso académico, era impossível não lhe agradecer individualmente. Para além de me ensinar a ler, a escrever, a fazer contas, saber a tabuada e a restante infinidade de coisas necessárias para a minha evolução académica, ensinou-me algo que, na minha opinião, é ainda mais importante, o amor por aquilo que fazemos! Na altura, apenas tive a percepção de uma professora sempre sorridente, que dá muito carinho e que, por alguma razão misteriosa, aquilo que me dizia ficava na cabeça. Hoje, sei que quando gostamos do que fazemos, quando acreditamos em nós e na pessoa que somos, conseguimos transmiti-lo aos outros e, podemos dessa forma acrescentar algo de positivo aos que nos rodeiam. Um muito obrigada!

Quero agradecer também, a muitos outros professores. Não só aos que me acompanharam ao longo do meu percurso académico na faculdade mas, em especial, aos que me acompanharam antes dele. Possibilitaram que chegasse a esta fase com êxito e com a segurança dos meus conhecimentos. Podia nomear cada um deles sem correr o risco de me esquecer de nenhum pois foram cruciais neste percurso.

Aos meus colegas de trabalho, Joana Ribeiro, Ivo Bernardo, António Soares e Catarina Nascimento, obrigada pela discussão e partilha de ideias e de momentos de pausa que proporcionaram. Obrigada por ajudarem a criar um bom ambiente no laboratório onde todos trabalhamos, o que facilita o dia a dia de todos nós.

Mãe, era impossível esquecer-me de ti. É impossível não dizer que és, e continuarás a ser sempre uma super mulher e o meu exemplo a seguir. Todo este percurso, chegar onde cheguei, ambicionar mais objectivos, sonhar com outros, seria impossível se não estivesse sempre presente. Obrigada por me teres ensinado e educado da forma que o fizeste. Obrigada pelos conselhos, opiniões, críticas e elogios que sempre fizeste questão de fazer. Tenho orgulho na pessoa que me tornei e no trabalho que faço e 90% desse orgulho é culpa tua.

Sofia Vieira, não estiveste presente, fisicamente, ao longo desta última fase. A vida obrigou-nos a estar mais longe uma da outra mas, não foi a distância que impediu que estivesse sempre presente e que fosses essencial na concretização deste trabalho e no cumprimento de mais um objectivo. Sempre disponível para me ouvir nas minhas “crises existenciais” e para me dizer aquilo que só um melhor amigo sabe e deve dizer. Estiveste lá para me apoiar sempre. Obrigada por tudo, minha grande amiga.

Por último, aos meus amigos, poderia escrever um testamento a cada um de vós com tudo aquilo que fizeram por mim. Podia nomear-vos um a um mas, penso que todos vocês sabem quem são. Um grande obrigada pelos momentos de conversa, pelas gargalhadas, pelos momentos de descontração, pela partilha e aprendizagem. Penso que ao longo deste tempo criei um grupo de amigos do qual me orgulho muito e que pretendo guardar e manter para sempre. Sem vocês, tenho a certeza que nada disto seria possível.

Abstract

The main goal of this study is to analyse the capacity of the Transient Electromagnetic Method (TEM) to detect anisotropic bodies within a soil section. For that purpose it was applied a numerical method developed by Professor Fernando Monteiro dos Santos of the Faculty of Lisbon, Lisbon University.

The TEM is defined by inducing an electromagnetic field in a soil section and study the structures response during a certain period of time. The most important parameters in this method are the structure resistivities present on the soil section, the time intervals used to measure and the resistivity contrasts between structures in the soil section.

The first thing to do was to validate the numerical method by evaluating the error associated with the calculation of the values of resistivity and magnetic field, studying some homogeneous models with a certain value of resistivity and applying the method to a synthetic model presented in Hohmann and Oristaglio (1984). The associated error is around 21.79% and the results obtained for the homogeneous models and the model in the paper were similar, validating the numerical method.

The main study of this thesis was applying the numerical method to a large number of synthetic models where we placed a number of different structures with three different orientations (horizontal, vertical and diagonal) and different dimensions. Then, we compared those models with others with a unique structure, with a theoretical resistivity value, calculated for each direction and the mean value in the section, and checked the correspondence.

Finally, the method was applied to real data, acquired near Moura, Portugal. It was build a model which response was equivalent to the curves obtained for the real data. The 2D model obtained should be a simplified version of the soil section.

We came to the conclusion that the numerical method allows to identify anisotropic structures, its orientation and horizontal location. It was possible to apply the method to real data and get a 2D model that corresponds with the real structure of the soil section of the local, where the data were acquired.

Key-words: Transient Electromagnetic Method (TEM), Anisotropy, Resistivity, numerical method

Resumo

O objectivo principal deste trabalho é estudar a presença de anisotropia em secção de solo com o Método Electromagnético Transiente (MET). Para tal utiliza-se um método numérico a duas dimensões (x e z) desenvolvido pelo Professor Doutor Fernando dos Monteiro Santos da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

O MET define-se pela indução de um campo electromagnético no solo e estudar a resposta das estruturas presentes no mesmo, ao longo do tempo. Os parâmetros fundamentais neste método são a resistividade das estruturas presentes no solo, os intervalos de tempo utilizados e os contrastes de resistividade existentes na secção de solo.

Começou-se por fazer a validação do método numérico, avaliando o seu erro, estudando vários modelos homogéneos com vários valores de resistividade e estudando um caso sintético apresentado por *Hohmann e Oristaglio (1984)*. O erro cometido pelo método numérico é de aproximadamente 21.79% e verificou-se que os resultados obtidos para o mesmo caso do artigo são equivalentes, validando assim o método numérico aplicado ao longo deste trabalho.

Seguidamente procedeu-se ao estudo de diversos modelos sintéticos nos quais se colocaram estruturas anisotrópicas em 3 disposições diferentes (horizontal, vertical e diagonal) e de várias dimensões procedendo-se à comparação desses modelos com outros de resistividade teórica transversal, longitudinal e média e verificando a coincidência entre modelos.

O método numérico foi posteriormente aplicado a um conjunto de dados reais, recolhidos na zona de Moura, Portugal. Neste caso foi construído um modelo que melhor se aproxima das curvas de variação da resistividade com o tempo reais, obtendo-se assim, um modelo 2D simplificado da secção de solo estudada.

Conclui-se que é possível com o método numérico aplicado, identificar a anisotropia de uma estrutura numa secção de solo, a sua orientação e localização horizontal. É possível também aplicar o método numérico a dados reais, sendo então possível construir um modelo a duas dimensões a partir de curvas de variação da resistividade com o tempo que corresponda a resultados reais obtidos.

Palavras-chave: método electromagnético transiente (MET), anisotropia, resistividade, método numérico

Índice Geral

Abstract	V
Resumo.....	VI
Índice Geral	VII
Índice de figuras	IX
Índice de tabelas	XII
Abreviaturas e Acrónimos.....	XV
Variáveis e Constantes Utilizadas	XV
1. Objectivo	1
2. Enquadramento Teórico	1
2.1 Métodos Indutivos	1
2.1.1 Método Indutivo no Domínio do Tempo (TDEM).....	2
2.1.2 Vantagens e Limitações da TDEM.....	4
2.1.3 Aplicabilidade da TDEM	5
2.2 Propriedades dos solos	5
2.2.1 Condutividade e Resistividade	5
2.2.2 Anisotropia	7
3. Modelo aplicado	9
3.1.1 Grelha e Geometria dos modelos testados.....	9
3.1.2 Equações de Difusão	10
3.1.3 Equações de Diferenças Finitas.....	13
3.1.4 Condições Fronteira	18
4. Avaliação do erro médio dos modelos	20
4.1 Modelo de semi-espaco com condutor vertical (alto contraste)	21
5. Apresentação de resultados	24
5.1 Anisotropia Horizontal	24
5.2 Anisotropia Vertical	28
5.3 Anisotropia Diagonal	31
6. Caso Prático – Moura	38

6.1	Enquadramento Geológico	38
6.2	Características das sondagens TEM	39
6.3	Resultados obtidos.....	41
7.	Discussão dos resultados	46
7.1	Dados Sintéticos	46
7.2	Caso Prático.....	50
8.	Conclusões	51
9.	Referências	52
10.	Anexos.....	53
10.1	Anexos A – Tabelas	53
10.2	Anexos B – Figuras	63

Índice de figuras

Fig. 1 – Funcionamento geral de um método indutivo	2
Fig. 2 – Princípios do Método Transiente; a) comportamento da corrente no <i>loop</i> transmissor; b) força electromotriz induzida no solo; c) campo magnético secundário medido na bobine receptora. Assume-se que a bobine receptora está no centro do <i>loop</i> transmissor. (Christiansen et al. 2002).....	3
Fig. 3 – Geometrias mais comuns utilizadas no método TEM. a) geometria de <i>central loop</i> ; b) geometria em <i>offset</i>	3
Fig. 4 – Modelo anisotrópico utilizado no presente trabalho e equações associadas para o cálculo da condutividade efectiva em cada uma das direcções (Monteiro Santos, 2006)	8
Fig. 5 – Geometria 2D dos modelos estudados neste trabalho, incluindo a grelha de diferenças finitas; x_i são os pontos de grelha na direcção x; z_i são os pontos de grelha na direcção z; Os pontos pretos representam os pontos de grelha para a camada de ar, necessários para a condição fronteira na interface Terra-Ar. (Oristaglio e Hohmann, 1984)	9
Fig. 6 – Espaçamento entre nodos na grelha de diferenças finitas utilizado em todos os modelos sintéticos estudados neste trabalho (Oristaglio e Hohmann, 1984)	10
Fig. 7 – Ponto de grelha típico, $E_{i,j}$, numa grelha de diferenças finitas, rodeada pelos seus vizinhos e blocos de condutividade constante; ABCD é o rectângulo formado pelos centros dos blocos vizinhos de $E_{i,j}$ (Oristaglio e Hohmann, 1984)	13
Fig. 8 - Perfis do fluxo magnético vertical (dBdz) para um semi-espaco condutor com um contraste de 1:1000. A geometria do modelo apresenta-se na base da figura (Oristaglio e Hohmann, 1984).....	21
Fig. 9 – Dimensões gerais de todos os modelos utilizados neste trabalho. A zona a azul é a zona de interesse, onde estão os corpos anisotrópicos e onde as células têm dimensões regulares de 10x10 m. A zona a castanho é constituída pelas restantes células de dimensões irregulares que variam entre 15 e 240 m em x e z.	22
Fig. 10 – Localização dos transmissores e receptores para cada geometria utilizada. (Verde – geometria <i>offset</i> ; Vermelho – geometria <i>central loop</i>).....	22
Fig. 11 – Variação do fluxo magnético vertical (dBdz), para cada tempo considerado, com a posição dos receptores para o modelo apresentado na figura 8, com geometria <i>offset</i>	23
Fig. 12 – Modelos com corpos dispostos horizontalmente, igualmente espaçados, em meio homogéneo de 300 Ω .m e geometria <i>central loop</i> . Canto superior esquerdo - 17HOR10D300L10C.txt (tabela 3 – 1); Canto superior direito - 1HOR10D300L10Crom.txt (tabela 3 – 2); Canto inferior esquerdo – 1HHOR10D300L10Crox.txt (tabela 3 – 3); Canto inferior direito – 1HOR10D300L10Croz.txt (tabela 4 – 4).....	25

Fig. 13 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s), para os modelos apresentados na figura 12, geometria de <i>central loop</i> . Canto superior esquerdo – Site 1 (antes das estruturas condutoras); Canto superior direito – Site 3 (início das estruturas condutoras); base – Site 7 (após as estruturas condutoras).....	26
Fig. 14 – Modelo com corpos condutores (azul claro) intercalados com corpos resistivos (castanho), em meio homogéneo de 300 $\Omega.m$ e geometria de <i>central loop</i> . Canto superior esquerdo – 10VERTCR10L300C.txt (tabela 6 – 1); Canto superior direito – 1VERTCR10L300Crom.txt (tabela 6 – 2); Canto inferior esquerdo – 1VERTCR10L300Crox.txt (tabela 6 – 3); Canto inferior direito . 1VERTCR10L300Croz.txt (tabela 6 – 4).....	28
Fig. 15 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s) para os modelos apresentados na figura 15. Canto superior esquerdo – Site 1 (antes das estruturas condutoras); Canto superior direito – Site 3 (início das estruturas condutoras); Canto inferior esquerdo – Site 4 (fim das estruturas condutoras); Canto inferior direito – Site 7 (após as estruturas condutoras).....	29
Fig. 16 – Modelos com 5 corpos diagonais descendentes (imagens à esquerda, de cima para baixo – 5DIAGDOWN10D10L100C.txt, 5DIAGDOWN10D10L100Crom.txt, 5DIAGDOWN10D10L100Crox.txt, 5DIAGDOWN10D10L100Croz.txt) e com 5 corpos condutores diagonais ascendentes (imagens à direita e de cima para baixo – 5DIAGUP10D10L100C.txt, 5DIAGUP10D10L100Crom.txt, 5DIAGUP10D10L100Crox.txt, 5DIAGUP10D10L100Croz.txt), em meio homogéneo de 300 $\Omega.m$ e geometria <i>central loop</i>	32
Fig.17 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s) para os sites 1, 3 e 7, dos modelos com disposição diagonal e com variação da profundidade dos corpos condutores apresentados na figura 16. Esquerda, de cima para baixo – Site 1, 3 e 7 para modelos com condutores progressivamente mais profundos; Direita, de cima para baixo – Site 1, 3 e 7 para modelos com condutores progressivamente mais superficiais.....	34
Fig. 18 – Mapa geológico simplificado da bacia Cenozóica de Vidigueira-Moura, indicando o local de Defesa de São Brás (local de recolha de dados). AF – falha do Alqueva; APF – falha do Alentejo-Plasencia; VMB – bacia de Vidigueira-Moura; VMF – falha de Vidigueira Moura (<i>Monteiro Santos et al., 2009</i>)	38
Fig. 19 – Localização das estruturas geológicas mais importantes e das sondagens geológicas feitas em Defesa de São Brás. (4+) – tensor de resistividade eléctrica; (o TEM1) – sondagens TEM; (linha) – perfil dipolo-dipolo. (<i>Monteiro Santos et al., 2009</i>)	39
Fig. 20 – Variação da resistividade ($\Omega.m$) com o tempo (μs) para as sondagens de interesse neste trabalho. (<i>Monteiro Santos et al., 2009</i>).....	40
Fig. 21 – Modelo de resistividade calculado a partir da inversão dos dados de dipolo-dipolo. (<i>Monteiro Santos et al., 2009</i>)	40

Fig. 22 – Secções de solo obtidas com os modelos gerados. Mod12.txt – esquerda; mod14.txt - direita	41
Fig. 23 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (μs) para o modelo 12 (200 $\Omega.m$). Comparação entre a curva dos dados recolhidos e as curvas do modelo criado. Site 1 / TEM 9 – Canto superior esquerdo; Site 6 / TEM 16 – Canto inferior direito; (Preto) – dados reais; (Verde) – dados sintéticos.....	43
Fig. 24 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (μs) para o modelo 14 (180 $\Omega.m$). Comparação entre a curva dos dados recolhidos e as curvas do modelo criado. Site 1 / TEM 9 – Canto superior esquerdo; Site 6 / TEM 16 – Canto inferior direito; (Preto) – dados reais; (Verde) – dados sintéticos.....	44
Fig. B1 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s), para os modelos apresentados na figura 12, geometria de offset. Canto superior esquerdo – Site 1 (antes das estruturas condutoras); Canto superior direito – Site 5 (início das estruturas condutoras); base – Site 13 (após as estruturas condutoras)	63
Fig. B2 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s) para os modelos apresentados na figura 15, para uma geometria <i>offset</i> . Canto superior esquerdo – Site 1 (antes das estruturas condutoras); Canto superior direito – Site 5 (início das estruturas condutoras); Canto inferior direito – Site 13 (após as estruturas condutoras)	64
Fig. B3 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s) para os sites 1, 5 e 13, dos modelos com disposição diagonal e com variação da profundidade dos corpos condutores apresentados na figura 17. Esquerda, de cima para baixo – Site 1, 5 e 13 para modelos com condutores progressivamente mais profundos; Direita, de cima para baixo – Site 1, 5 e 13 para modelos com condutores progressivamente mais superficiais, para uma geometria <i>offset</i>	65

Índice de tabelas

Tabela 1 – Características dos 6 modelos teste criados com geometria <i>offset</i>	20
Tabela 2 – Análise do erro para o modelo de meio homogêneo de 250 Ω .m, em geometria <i>offset</i>	20
Tabela 3 – Características dos 4 modelos a analisar com disposição horizontal, para a geometria de <i>central loop</i>	24
Tabela 4 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos apresentados na figura 12 e tabela 3, para a geometria <i>central loop</i>	27
Tabela 5 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos apresentados na figura 12 e tabela 3, para a geometria <i>central loop</i>	27
Tabela 6 – Características dos 4 modelos analisados, para a geometria <i>central loop</i> , com disposição vertical.....	29
Tabela 7 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos apresentados na figura 15, para a geometria <i>central loop</i>	30
Tabela 8 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos apresentados na figura 15, para a geometria <i>central loop</i>	30
Tabela 9 – Características dos 4 modelos a analisar, para a geometria <i>central loop</i> , com corpos dispostos de forma diagonal	33
Tabela 10 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos à direita na figura 17, para a geometria <i>central loop</i>	35
Tabela 11 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos à esquerda na figura 17, para a geometria <i>central loop</i>	36
Tabela 12 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos à direita na figura 17, para a geometria <i>central loop</i>	36
Tabela 13 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos à esquerda na figura 17, para a geometria <i>central loop</i>	37
Tabela 14 – Comparação média entre os valores de resistividade dos dados reais e os valores de resistividade dos dados sintéticos para o modelo 12 com 200 Ω .m de resistividade do meio.	43
Tabela 15 – Comparação entre os valores de resistividade dos dados reais e os valores de resistividade dos dados sintéticos para o modelo 14 com 180 Ω .m de resistividade do meio.	45
Tabela 16 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para cada disposição horizontal, geometria <i>central loop</i>	46

Tabela 17 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição vertical, para a geometria <i>central loop</i>	47
Tabela 18 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição diagonal, para a geometria <i>central loop</i>	48
Tabela 19 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição horizontal, para a geometria <i>offset</i>	48
Tabela 20 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição vertical, para a geometria <i>offset</i>	49
Tabela 21 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição diagonal, para a geometria <i>offset</i>	49
Tabela A1 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria <i>central loop</i> , com corpos dispostos horizontalmente	53
Tabela A2 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria <i>central loop</i> , com corpos dispostos verticalmente	54
Tabela A3 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria <i>central loop</i> , com corpos dispostos na diagonal.....	55
Tabela A4 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria <i>offset</i> , com corpos dispostos horizontalmente	56
Tabela A5 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria <i>offset</i> , com corpos dispostos verticalmente	57
Tabela A6 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria <i>offset</i> , com corpos dispostos na diagonal.....	58
Tabela A7 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos apresentados na figura 12 e tabela 3, para a geometria <i>offset</i>	59
Tabela A8 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos apresentados na figura 12 e tabela 3, para a geometria <i>offset</i>	59
Tabela A9 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos apresentados na figura 15 e tabela 6, para a geometria <i>offset</i>	60
Tabela A10 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos apresentados na figura 15 e tabela 6, para a geometria <i>offset</i>	60
Tabela A11 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos à direita na figura 17, para a geometria <i>offset</i>	61

Tabela A12 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos à esquerda na figura 17, para a geometria <i>offset</i>	61
Tabela A13 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos à direita na figura 17, para a geometria <i>offset</i>	62
Tabela A14 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos à esquerda na figura 17, para a geometria <i>offset</i>	62

Abreviaturas e Acrónimos

AMT – Audio-Magneto-Telúrico
CFL – Courant-Friedrichs-Lewy (condição de estabilidade)
FCUL – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
FDEM – “Frequency Domain Electromagnetic Method”
FVM – Falha Vidigueira-Moura
MEDF – Método Electromagnético no Domínio da Frequência
MEDT – Método electromagnético no domínio do tempo
MET – Método Electromagnético Transiente
MT – Magneto-Telúrico
TDEM – “Time Domain ElectroMagnetic Method”
TEM – “Transient Electromagnetic Method”

Variáveis e Constantes Utilizadas

$\bar{\sigma}_{i,j}$ – média pesada, pela área, das condutividades vizinhas
a – constante de difusão
b – indução magnética
c – velocidade da luz no espaço vazio
d – desfasamento dieléctrico
E – intensidade do campo eléctrico
 G_d – função de Green para difusão pura
 G_w – função de Green
H(t) – função de Heaviside
h, H – intensidade do campo magnético
I – corrente eléctrica
j, J_s – densidade da corrente eléctrica
K – coeficiente dieléctrico complexo
ncf – número de colunas final
nci – número de colunas inicial
nlf – número de linhas final
nli – número de linhas inicial
R – Distância à fonte
 $r_{i,j}$ – razão de grelha
 r_s – raio da esfera
Rx – receptor

t – tempo

T_x - transmissor

Δ – distância entre pontos de grelha

Δt – passo de tempo

Δt_{\max} – passo de tempo máximo

Δx – distância entre pontos de grelha em x

Δz – distância entre pontos de grelha em z

$\delta()$ – função delta representativa da fonte nas várias direcções

$\varepsilon = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m – permitividade no espaço vazio

$\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m – permeabilidade no espaço vazio

v – velocidade da onda

ρ – densidade de carga eléctrica

ρ – resistividade efectiva

ρ' – resistividade efectiva real

ρ'' – resistividade efectiva imaginária

σ – condutividade efectiva

σ' – condutividade efectiva real

σ'' – condutividade efectiva imaginária

τ_{2D} – constante de tempo para bloco rectangular

τ_s – constante de tempo na esfera

ω – frequência angular

1. Objectivo

Pretende-se com este trabalho verificar a aplicabilidade de um método electromagnético indutivo no domínio do tempo (MEDT - Método Electromagnético no Domínio do Tempo ou TDEM – “Time Domain Electromagnetic Method”) para o estudo das anisotropias em secções a duas dimensões. Para tal utiliza-se um método numérico desenvolvido em Fortran pelo Professor Fernando Santos, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), no estudo de dados sintéticos que simulem secções de solo com diferentes características e corpos anisotrópicos em diferentes disposições bem como a aplicação do método a um conjunto de dados reais recolhidos na zona de Moura, Portugal.

2. Enquadramento Teórico

O trabalho a desenvolver, tem como fundamentos teóricos a propagação do campo electromagnético, ao longo do tempo, num determinado meio e a correspondente resposta desse meio ao campo electromagnético que se propaga.

Tem como equações fundamentais as equações de Maxwell, que descrevem o comportamento do campo eléctrico e magnético num determinado meio e as suas interacções e interdependências, ao longo do tempo. De um modo geral, as equações de Maxwell podem ser escritas da seguinte forma:

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{b}}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{h} - \frac{\partial \vec{d}}{\partial t} = j \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{b} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{d} = \rho \quad (2.4)$$

Os fenómenos existentes que implicam a propagação do campo electromagnético e a resposta do meio são diversos e vastos, bem como os métodos que existem para o estudo dos diversos fenómenos.

No âmbito deste trabalho pretende-se estudar a resposta do meio à propagação do campo electromagnético, ao longo do tempo, num meio com corpos anisotrópicos.

2.1 Métodos Indutivos

Os métodos denominados de indutivos têm como princípio os fenómenos de indução electromagnética sem a existência de acoplamento galvânico. Estes métodos podem inserir-se em dois grupos: métodos indutivos de fonte controlada (caso do método utilizado neste trabalho, TDEM), e métodos indutivos de fonte natural (caso de métodos como a Audio-Magneto-Telúrico (AMT) e a Magneto-Telúrico (MT)). As fontes controladas pressupõem que o utilizador pode controlar as diversas variáveis do campo electromagnético que é induzido no meio em estudo. As fontes naturais estão associadas, fundamentalmente, a fenómenos de interacção entre o vento solar e a magnetosfera da Terra e às tempestades meteorológicas que ocorrem na atmosfera do planeta.

Dentro dos dois grupos de métodos indutivos, existem os que trabalham no domínio da frequência (“Frequency Domain Electromagnetic Method” – FDEM) e os que trabalham no domínio do tempo (TDEM). Os métodos que trabalham no domínio da frequência, utilizam campos diferentes segundo a

frequência utilizada, que depende da profundidade que se pretende atingir. Os métodos indutivos no domínio do tempo denominam-se desta forma visto que a amplitude do sinal é função do tempo. À medida que as medições são feitas para intervalos de tempo maiores, o campo vai-se difundindo a uma distância maior e, portanto, a uma maior profundidade sendo que a qualidade dos dados recolhidos, está dependente da relação entre a intensidade do campo electromagnético induzido e o sinal que é absorvido e emitido pelos condutores no subsolo. A título de exemplo, para o mesmo campo electromagnético induzido, um terreno com características mais resistivas vai permitir a recolha de dados a uma profundidade mais elevada do que um terreno com características mais condutoras.

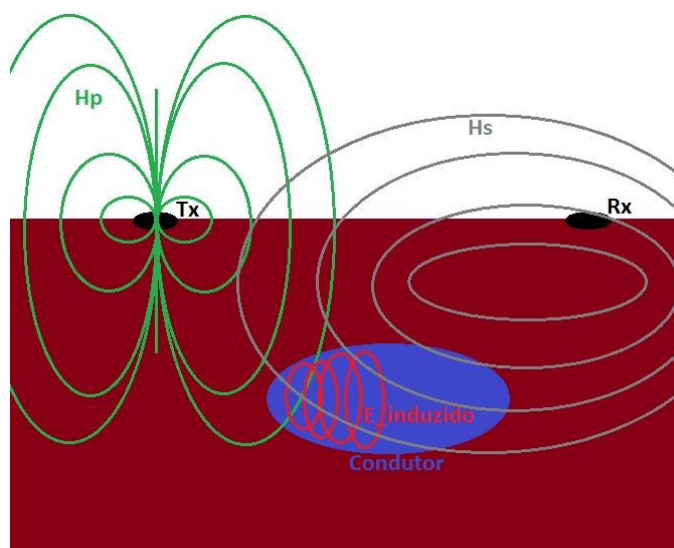


Fig. 1 – Funcionamento geral de um método indutivo

Como se pode observar na figura 1, o funcionamento de um método indutivo pressupõe um receptor (Rx) e um transmissor (Tx) colocados na superfície do terreno ou a uma dada altitude, no caso de métodos aero-electromagnéticos. O campo magnético variável gerado no transmissor, definido como campo primário ou principal (H_p), induz correntes no material condutor do subsolo (E_{induzido}). Essas correntes induzidas geram, consequentemente, um campo magnético secundário (H_s) que é medido no receptor em conjunto com o campo primário.

2.1.1 Método Indutivo no Domínio do Tempo (TDEM)

As medições feitas com este método têm como objectivo medir o campo magnético secundário visto que é este que fornece informações acerca da estrutura condutiva do solo. Isto porque o campo magnético variável que é induzido no solo gera correntes induzidas no condutor, que são mais fortes ou mais fracas consoante o valor de condutividade do condutor (material e estrutura do mesmo) e da distância a que se encontra da fonte. São estas correntes induzidas geradas nos condutores do subsolo que, por sua vez, geram o campo magnético secundário que é lido no receptor.

Este método tem uma escala dinâmica visto que o intervalo de tempo em que são feitas as medições é muito variável e que a amplitude do sinal pode variar num factor de 1000. Outra característica do sinal medido é que não permite a filtragem directa de forma a evitar o ruído electromagnético envolvente. O ruído é assim evitado através da medição em intervalos de sinal transiente e do “stacking”, ou seja, a repetição das medições e o cálculo da média dessas medições.

A aplicação do método transiente passa pela utilização de uma corrente directa que atravessa um *loop* com uma dada área. Essa corrente é abruptamente interrompida e a taxa de variação do campo magnético secundário, devido às correntes induzidas, é medido utilizando uma bobine de indução colocada no receptor. Pretende-se com isto a ausência do campo magnético primário aquando das medições. Na figura 2 pode-se observar os princípios de funcionamento da TEM.

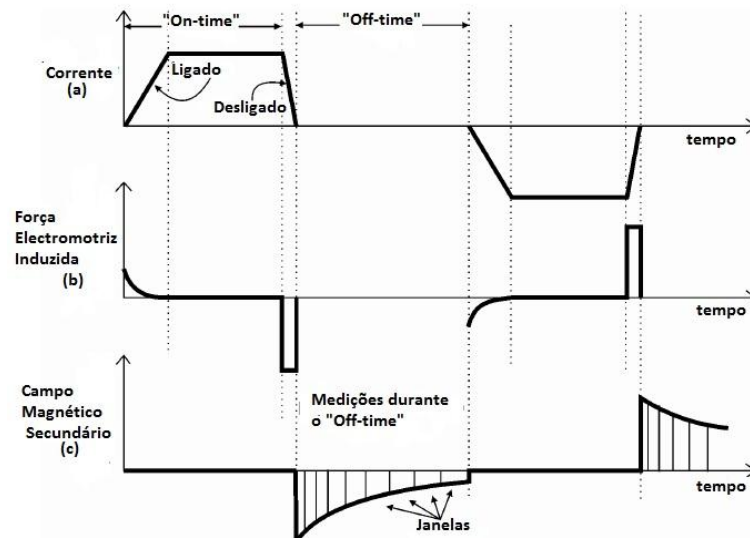


Fig. 2 – Princípios do Método Transiente; a) comportamento da corrente no *loop* transmissor; b) força electromotriz induzida no solo; c) campo magnético secundário medido na bobine receptora. Assume-se que a bobine receptora está no centro do *loop* transmissor. (Christiansen et al. 2002)

Os valores típicos utilizados, para sondagens no solo, são intervalos de tempo de 50-200 ms para a rampa de *turn on*, 1-40 ms de *on-time*, 1-30 ms de rampa de *turn-off* e 1-40 ms de *off-time* para medições (Christiansen et al. 2002). O registo dos dados é feito em janelas de tempo que são, por norma, distribuídas de forma logarítmica aumentando o seu comprimento com o tempo, de forma a melhorar a razão sinal/ruído (S/R) para os tempos longos.

Uma sondagem típica contém 1.000 a 10.000 pulsos de tempo transiente individuais. A variação do sinal da corrente permite minimizar o sinal de corrente das linhas de electricidade, no caso de se escolher uma frequência de repetição que seja uma sub-harmónica da frequência da mesma. Para além disso, permite minimizar o *static shift* nos amplificadores dos instrumentos.

Podem ser utilizadas diversas geometrias de transmissor/receptor. No entanto, as mais comuns são a de *central loop* e em *offset*. A figura 3 mostra estas duas geometrias.

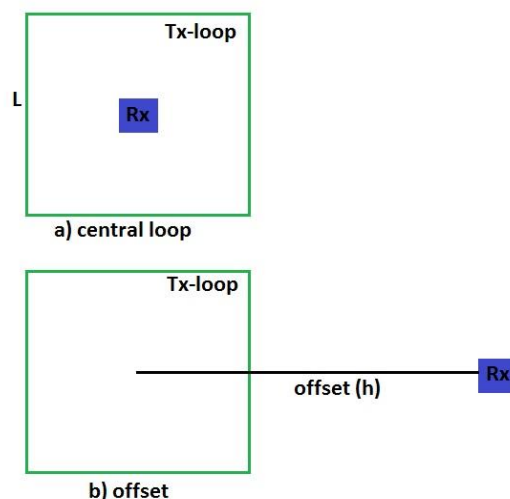


Fig. 3 – Geometrias mais comuns utilizadas no método TEM. a) geometria de *central loop*; b) geometria em *offset*

A configuração escolhida para recolher medições está dependente do objectivo que se pretende atingir e das características do terreno. Aquando da realização de um dado perfil, efectua-se várias

sondagens com a mesma geometria de medição. Enquanto que no primeiro caso, apresentado na figura 3, tanto o *loop* transmissor como o receptor se movimentam a uma mesma distância a cada sondagem, no segundo caso, o *loop* transmissor mantém-se no mesmo local enquanto que a distância do receptor ao transmissor vai aumentando a cada sondagem que é feita. Com o primeiro caso garante-se que o campo eléctrico que é induzido no solo é sempre o mesmo e, por isso, a área de solo abrangida é sempre a mesma com a mesma intensidade. No segundo caso, visto que o *loop* transmissor se mantém sempre no mesmo local, à medida que se afasta o receptor do transmissor, o campo magnético que este recebe é progressivamente menos intenso.

2.1.2 Vantagens e Limitações da TDEM

Independentemente do método electromagnético aplicado para o estudo de uma secção de solo e das suas propriedades, as variáveis que são necessárias ter em consideração são diversas, e, é difícil de controlá-las no seu conjunto.

Do ponto de vista prático, relativamente ao método aplicado neste trabalho, as características do ambiente envolvente à secção que se pretende estudar, o tamanho do *loop* e a intensidade de corrente que se consegue injectar no solo, são os factores que mais influenciam a qualidade dos dados. Para a recolha de dados num determinado local, é necessário que esse local esteja livre de estruturas eléctricas e metálicas como, por exemplo, cabos de electricidade ou linhas-férrreas. Isto porque, tendo em conta que o funcionamento do método passa pela injeção de uma corrente eléctrica e da criação de campos secundários, a presença de tais estruturas leva a que exista um acoplamento entre o circuito gerado pelo equipamento e a estrutura. Os acoplamentos mais comuns são o galvânico e o capacitivo. O primeiro, ocorre, com estruturas como linhas de alta tensão, vedações e rails de estrada e o segundo, com cabos eléctricos que possam existir no chão. Este acoplamento leva a que os dados recolhidos fiquem completamente alterados devido ao ruído.

A resolução pode ser definida pelo tamanho do *loop* utilizado, ou seja, a escala mínima dos corpos que é possível detectar. Um *loop* com dimensões elevadas (40 a 100 m) permite fazer medições dentro do próprio *loop* e permite que essas medições tenham um momento magnético forte. No entanto, a eficiência do campo é baixa e o acoplamento com estruturas envolventes é mais provável. Um *loop* menor, com uma intensidade de corrente de injeção elevada permite uma grande precisão nos dados recolhidos devido à eficiência do campo. Por outro lado, medições em configuração de *central loop* levam à saturação do receptor distorcendo o sinal, o fenómeno de polarização induzida é mais comum, a variabilidade da resistividade superficial é detectada.

A corrente que é possível injectar no solo vai afectar não só a precisão que se obtém nos dados como a profundidade que se consegue atingir sem que o ruído distorça totalmente os dados. Um valor de intensidade de corrente baixo, permitirá uma recolha de dados com qualidade até uma profundidade baixa, assim como um valor alto permitirá ir a maior profundidade. Claro que a profundidade que se consegue atingir está dependente também das características do solo, do ponto de vista de valores de condutividade/resistividade. Uma secção mais condutora vai permitir atingir menor profundidade que uma secção menos condutora, para um mesmo valor de intensidade de corrente de injeção.

Do ponto de vista da modelação dos dados, o facto de o método ser aplicado no tempo, permite que sejam atingidas várias profundidades sem a alteração da geometria ou da intensidade de corrente injectada. A variação do tempo de amostragem será suficiente para que se atinja uma profundidade diferente. Claro que, como já referido, a profundidade que é possível atingir está dependente de outros factores. No entanto, em comparação com métodos que funcionam com a frequência, este não é tão limitativo. Para além disso, ao contrário de métodos que funcionam com a frequência, este método permite medir apenas o campo magnético secundário em vez de o conjunto do campo primário com o secundário. O campo magnético secundário é aquele que tem a informação das características electromagnéticas do solo, pelo que é aquele que tem interesse do ponto de vista da modelação e interpretação.

As questões com as quais é mais difícil de lidar são as condições iniciais, a grelha a aplicar e as condições fronteira. Estas condições são progressivamente mais complexas consoante se pretende fazer uma modelação e interpretação 1D, 2D ou 3D. A questão torna-se ainda mais complexa quando

se pretende lidar com o problema inverso. No problema directo, pretende-se ajustar uma curva, superfície ou volume a um conjunto de dados que foram recolhidos. Esse trabalho, apesar de extenso e complexo, permite que se faça um conjunto de testes de tentativa e erro. Com o problema inverso é necessário ter conhecimento de outro tipo de características do local e enquadrá-lo em estudos já realizados do local para que o modelo obtido se enquadre, geologicamente, no local. Nos capítulos seguintes, estes problemas são discutidos em maior detalhe e a forma como foram tratados para este trabalho, em específico.

2.1.3 Aplicabilidade da TDEM

Estes métodos foram originalmente pensados para a investigação de minério. No entanto, a sua aplicabilidade para fins hidrogeológicos tem vindo a ser comprovada sendo que a exigência de dados precisos e em quantidade são factores determinantes quando se pretende utilizá-los nesta área.

Actualmente, a sua aplicabilidade para a detecção de aquíferos, agricultura de precisão, exploração petrolífera é comum, e tem sido bastante bem sucedida.

Neste trabalho pretende-se demonstrar que, com o modelo construído, é possível detectar corpos anisotrópicos com um modelo 2D, localiza-los no terreno, definir a sua extensão e deduzir as suas características. Terá assim em vista uma aplicabilidade na exploração de minério e estruturas de interesse geológico como falhas e diques.

2.2 Propriedades dos solos

Qualquer que seja o método geofísico aplicado para o estudo de uma dada secção de solo, este está dependente das diversas propriedades do solo. Podem nomear-se diversas propriedades do solo que têm influência na resposta que se obtém de uma dada secção tal como a sua resistividade, condutividade, condutância, porosidade, conteúdo em água, tipo de solo, etc. No entanto, há propriedades que têm uma maior relevância que outras.

Existe uma interdependência entre as diversas propriedades que é relevante para os resultados que se obtém na modelação de uma dada secção. No caso do método aplicado neste trabalho e da modelação feita, as propriedades às quais importa dar relevância são as que se apresentam em 2.2.1 e 2.2.2, ou seja, a condutividade, a resistividade e a anisotropia.

2.2.1 Condutividade e Resistividade

Em termos gerais a condutividade e a resistividade são duas propriedades opostas e intrínsecas das rochas. A primeira é a capacidade da rocha em fazer passar um dado campo eléctrico sem o absorver sendo a segunda, sua oposta, a capacidade de absorver esse mesmo campo eléctrico sem que este possa passar para o restante meio. No entanto, estas são características qualitativas de uma dada rocha e, por isso, não mensurável. Quando se pretende falar nestas características do ponto de vista quantitativo, fala-se em condutividade e resistividade efectivas.

A condutividade efectiva (σ) é então uma propriedade intrínseca da rocha que quantifica a relação que existe entre o campo eléctrico (\mathbf{E}) e a densidade de corrente (\mathbf{J}) que atravessa uma unidade volúmica dessa rocha que, segundo a lei de Ohm, essa relação vem dada por:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.5)$$

Esta propriedade é uma propriedade tensorial tendo então nove componentes no sistema cartesiano:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Os valores que constituem a diagonal da matriz apresentada em (2.6) são os valores principais da condutividade. Este tensor é simétrico pelo que se for representado pelos valores de condutividade principal, a matriz representada em (2.6) é uma matriz diagonal em que os restantes seis valores são iguais a zero.

Quando os valores principais de condutividade são todos iguais, esta grandeza torna-se escalar. No entanto, isso acontece num caso particular onde os materiais são isotrópicos. Quando os materiais são anisotrópicos a grandeza tem que ser representada por um tensor. Esta questão será discutida em 2.2.2.

A condutividade eléctrica efectiva é dependente da frequência do campo eléctrico sendo então uma grandeza complexa e variável. Pode ser representada pela seguinte equação:

$$\sigma = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega) \quad (2.7)$$

Da mesma forma, a resistividade efectiva (ρ) é uma grandeza complexa e variável dependente da frequência do campo eléctrico que se pode representar:

$$\rho = \rho'(\omega) - i\rho''(\omega) \quad (2.8)$$

Nas equações (2.7) e (2.8), $\omega=2\pi f$, é a frequência angular e f a frequência em Hertz (Hz) e $i=\sqrt{-1}$.

A relação das componentes real e imaginária da condutividade e resistividade efectiva, respectivamente, pode ser dada por:

$$\rho' = \frac{\sigma'}{|\sigma|^2} \quad (2.9)$$

$$\rho'' = \frac{\sigma''}{|\sigma|^2} \quad (2.10)$$

Diversos estudos sugerem que a componente imaginária é muito sensível à contaminação e à presença de argila, sendo factores determinantes nos dados que se obtêm. No entanto, para um dado intervalo de frequências, mais utilizados nos estudos e sondagens, a condutividade eléctrica pode ser representada por um escalar mas não é possível definir a grandeza inversa, ou seja, a resistividade eléctrica efectiva. Assim, para essa gama de frequências, a condutividade eléctrica efectiva pode ser definida como:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.11)$$

Sendo a condutividade e a resistividade propriedades intrínsecas dos materiais, a forma como a corrente é conduzida está dependente do tipo de materiais que a corrente atravessa. Os processos físicos que permitem a condução de corrente são diversos. No entanto, a classificação em condução electrónica, electrolítica e de semi-condutor é comum e pretende traduzir o processo físico dominante num determinado caso. Consoante o processo que é dominante, a condutividade eléctrica tem um comportamento diferente ou é representada por uma relação diferente. Por exemplo, no caso de o

processo dominante ser um semi-condutor, a relação que representa a condutividade é uma relação exponencial onde se destaca não só o campo eléctrico aplicado como a temperatura a que se encontra o material.

Existem duas características dos solos que são de extrema importância no comportamento da condutividade eléctrica. Essas duas características são a presença de argila e o conteúdo em água e minerais dissolvidos no solo.

A presença da argila, numa dada secção, diminui o valor de resistividade eléctrica do material e torna a propriedade dependente da frequência do campo electromagnético. Isto porque a argila tem uma superfície electricamente activa que, de uma forma resumida, se relaciona com o facto de a argila, do ponto de vista da sua estrutura molecular, se organizar de forma a que não seja neutra do ponto de vista eléctrico (normalmente é electricamente negativa) e por isso ter a necessidade de captar iões do ambiente.

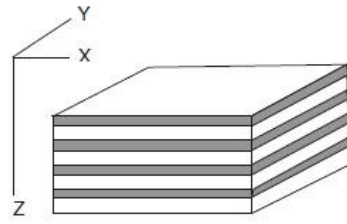
O conteúdo em água e minerais dissolvidos na mesma, influencia as propriedades dieléctricas das rochas. Em especial a permissividade eléctrica está dependente da frequência e do conteúdo em água. O coeficiente dieléctrico complexo, K , é a grandeza que se utiliza para o estudo das propriedades dieléctricas das rochas e, tal como a condutividade e resistividade é uma variável complexa com parte real e imaginária. No entanto, vários estudos indicam que a parte imaginária é pequena quando comparada com a parte real, chegando-se à conclusão que para a gama de frequências entre 1MHz e 1GHz, o conteúdo em água domina as propriedades dieléctricas do material visto que a constante dieléctrica da água é, aproximadamente, 20 vezes maior que a constante dieléctrica da matriz rochosa. Ora, no caso de uma secção em que o conteúdo em água é grande, é necessário ter esse efeito em conta pois vai camuflar o valor real da condutividade do material que se pretende estudar.

2.2.2 Anisotropia

O conceito de anisotropia está associado ao conceito de isotropia, seu oposto. Um corpo dito isotrópico define-se como um corpo que tem as mesmas dimensões e é constituído de forma homogénea pelo mesmo material, em todas as direcções. Um corpo anisotrópico é aquele em que, numa ou mais direcções, tem uma dimensão diferente, uma constituição variável ou ambos. Por exemplo, um corpo esférico e homogéneo é um corpo isotrópico, pois não existe nenhuma direcção preferencial em que um campo electromagnético se propague. Por outro lado, se se considerar um corpo paralelepípedo e homogéneo, este já é anisotrópico visto que tem uma direcção (a de maior comprimento) que é preferencial na propagação do campo electromagnético.

Do ponto de vista da condutividade eléctrica efectiva, quando se está na presença de corpos isotrópicos podemos considerar esta grandeza como um escalar. Já no caso de corpos anisotrópicos, temos que considerar, pelo menos, as três direcções principais que definem o tensor da condutividade. Isto porque no caso de um corpo anisotrópico, os vectores de campo eléctrico e densidade de corrente, só são colineares se o campo eléctrico for aplicado sobre a direcção dos eixos principais do tensor.

Existem alguns modelos simples que têm em conta a anisotropia de um dado meio e dos quais é possível deduzir as fórmulas de cálculo da condutividade efectiva nas várias direcções. No caso do presente trabalho, fazendo as devidas adaptações a uma modelação a duas dimensões, teve-se em conta o modelo apresentado na figura 4 e as equações a ele associadas.



$$\sigma_x = \sigma_y = p \sigma_1 + (1 - p) \sigma_2$$

$$\sigma_z = \sigma_1 \sigma_2 / [p \sigma_2 + (1 - p) \sigma_1]$$

Fig. 4 – Modelo anisotrópico utilizado no presente trabalho e equações associadas para o cálculo da condutividade efectiva em cada uma das direcções (*Monteiro Santos, 2006*)

Na figura 4, σ_1 e σ_2 correspondem à condutividade de cada um dos materiais do modelo e p e $(p-1)$ são as fracções volúmicas de material que correspondem a cada uma das condutividades. No caso do presente trabalho, apenas se utilizaram duas direcções, x e z , sendo que as fórmulas apresentadas não sofrem qualquer alteração.

3. Modelo aplicado

O código Fortran utilizado neste trabalho, construído pelo Professor Fernando dos Santos (FCUL), é baseado no artigo de *Oristaglio e Hohmann (1984)* que descreve um método numérico simples para simular sondagens electromagnéticas transientes onde os lados maiores do *loop* transmissor estão ao longo do *strike* geológico local e o campo magnético é medido ao longo de linhas perpendiculares a esse *strike*.

Os modelos estudados no artigo são exclusivamente 2D tal como se pretende fazer neste trabalho. No entanto, os modelos estudados no artigo mostraram diversas características de sondagens transientes como formas e localizações de anomalias típicas e as suas taxas de decaimento.

O método numérico utilizado é baseado num esquema de diferenças-finitas explícito originalmente proposto por *DuFort e Frankel (1953)* para a equação de difusão a 1D e mais tarde estendido para 2D por *Birtwistle (1968)*. No caso do código utilizado foram feitas duas alterações importantes para a modelação geofísica. A primeira, a generalização do método de DuFort-Frankel para modelos heterogéneos e de grelhas irregulares e, a segunda, a inclusão de uma condição fronteira numérica na interface Terra-Ar para evitar a inclusão da camada de ar na grelha utilizada.

Em cada um dos modelos testados é medida a resposta negativa do campo, ou seja, a resposta obtida pelo desligar a corrente contínua e observar o decaimento do campo magnético.

3.1.1 Grelha e Geometria dos modelos testados

Todos os modelos testados neste trabalho têm uma grelha irregular nas duas direcções consideradas (x e z).

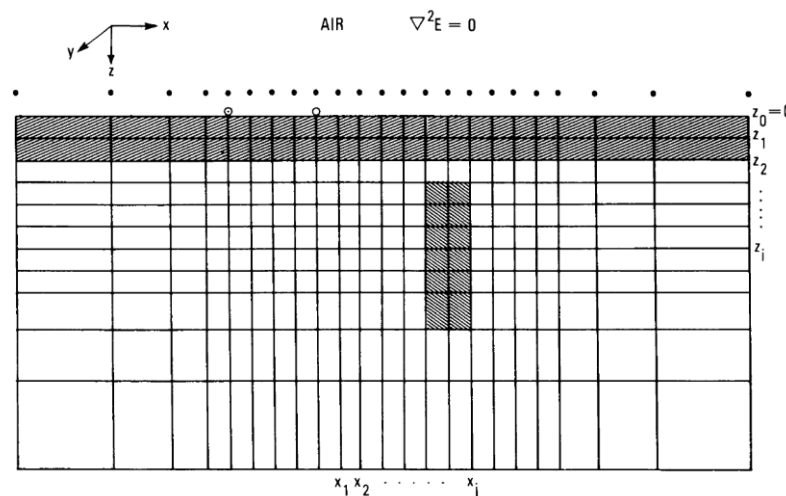


Fig. 5 – Geometria 2D dos modelos estudados neste trabalho, incluindo a grelha de diferenças finitas; x_i são os pontos de grelha na direcção x; z_i são os pontos de grelha na direcção z; Os pontos pretos representam os pontos de grelha para a camada de ar, necessários para a condição fronteira na interface Terra-Ar. (*Oristaglio e Hohmann, 1984*)

X-direction		Z-direction	
Nodes	Spacing	Nodes	Spacing
1-10	240	1-54	10
10-14	120	54-59	15
14-19	60	59-64	30
19-25	30	64-69	60
25-33	15	74-79	240
33-167	10		
167-171	15		
171-177	30		
177-182	60		
182-186	120		
186-195	240		

Fig. 6 – Espaçamento entre nodos na grelha de diferenças finitas utilizado em todos os modelos sintéticos estudados neste trabalho (*Oristaglio e Hohmann, 1984*)

Como se pode observar na figura 5, a geometria utilizada nos modelos estudados consiste numa grelha 2D irregular cujos espaçamentos entre nodos são apresentados na figura 6. Na direcção x, a grelha tem um espaçamento mais largo junto às fronteiras e mais estreito no centro. Já na direcção z, a grelha vai sendo progressivamente mais espaçada em profundidade. Esta grelha irregular permite minimizar os problemas de fronteira devido à menor intensidade do campo induzido junto às fronteiras e à variação rápida no meio, junto à fonte do campo induzido.

A condutividade, $\sigma = \sigma(x, z)$, pode variar de bloco para bloco ao longo do plano (x, z) enquanto que a permeabilidade, μ , e a permissividade, ϵ , são constantes assumindo-se os valores no espaço vazio, ou seja, $(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$ e $(8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m})$, respectivamente.

A grelha utilizada nos vários modelos tem 79 nodos na direcção z, 195 nodos na direcção x com os espaçamentos que são apresentados na figura 6. Na sua totalidade, cada um dos modelos estudados tem um comprimento (direcção x) de 7100 m e uma profundidade (direcção z) de 2855 m. Por forma a evitar os problemas de fronteira, modelos estudados que contenham condutores, estes são colocados na área onde as células têm dimensões de 10 m em ambas as direcções. Os *loops* transmissores e os receptores são também colocados perpendicularmente nessas zonas com o mesmo objectivo. Para além disso, os problemas de dispersão numérica aumentam junto às fronteiras sendo que se tenta também evitar esse factor ao máximo.

3.1.2 Equações de Difusão

As equações de Maxwell que descrevem o campo eléctrico e magnético (respectivamente), no modo transiente, para duas dimensões são definidas da seguinte forma:

$$\vec{E}(x, z, t) = E_y \vec{y} \quad (3.1)$$

$$\vec{H}(x, z, t) = H_x \vec{x} + H_z \vec{z} \quad (3.2)$$

As equações (3.1) e (3.2) reduzem-se a uma equação escalar para o campo eléctrico, na direcção de *strike*, fazendo $E_y = E$:

$$\partial_{xx} E + \partial_{zz} E - \mu \sigma \partial_t E - \mu \epsilon \partial_{tt} E = \mu \partial_t J_s \quad (3.3)$$

A equação (3.3) é uma equação semelhante a uma equação de amortecimento de onda. No entanto, no caso da Terra, a condutividade é muito maior que a permissividade o que leva a que o 4º termo da

equação seja muito menor que o 3º e que, por isso, as características de onda do campo eléctrico desapareçam rapidamente e que o comportamento difusivo seja dominante no comportamento do campo eléctrico. Assim, desprezando o 4º termo da equação (3.3), ou seja, desprezando as correntes de deslocamento, obtém-se o limite difusivo, com o campo eléctrico (\mathbf{E}) a satisfazer a equação de difusão dada por:

$$\partial_{xx} E + \partial_{zz} E - \mu \sigma \partial_t E = \mu \partial_t J_s \quad (3.4)$$

Para a maioria dos modelos geofísicos, o limite difusivo corresponde a tempos muito próximos. Considere-se, como exemplo, a função de Green no espaço vazio para a equação (3.3) que tem unidades de campo eléctrico quando definida como solução de:

$$\partial_{xx} G_w + \partial_{zz} G_w - \mu \sigma \partial_t G_w - \mu \varepsilon \partial_{tt} G_w = -\mu I \delta(x) \delta(z) \delta(t); \quad (3.5)$$

onde a fonte é uma função delta de amplitude μI .

Do ponto de vista físico, a função de Green (G_w) corresponde ao campo eléctrico que é induzido pelo desligar da corrente contínua (I) ao longo de uma fonte linear num meio homogéneo. Ou seja, fazendo a fonte de corrente igual a:

$$J_s(x, z, t) = I \delta(x) \delta(z) [1 - H(t)], \quad (3.6)$$

onde $H(t)$ é uma função de Heaviside.

Segundo *Wolf (1979)*, a função G_w , é dada por:

$$G_w(x, z, t) = \frac{\mu I}{2\pi} \frac{e^{-(\sigma/2\varepsilon)t} \cosh\left[\frac{\sigma}{2\varepsilon} \left(t^2 - \frac{R^2}{c^2}\right)^{1/2}\right]}{\left(t^2 - \frac{R^2}{c^2}\right)^{1/2}} H\left(t - \frac{R}{c}\right); \quad (3.7)$$

onde, $R=(x^2+z^2)^{1/2}$, é a distância à fonte e, $c=(\mu\varepsilon)^{-1/2}$, é a velocidade da luz no espaço vazio.

A função de Green, G_d , para a equação de difusão pura é:

$$\partial_{xx} G_d + \partial_{zz} G_d - \mu \sigma \partial_t G_d = -\mu I \delta(x) \delta(z) \delta(t); \quad (3.8)$$

onde G_d , é dado por:

$$G_d(x, z, t) = \frac{\mu I}{4\pi t} e^{-\mu \sigma R^2 / 4t}; \quad (3.9)$$

O que se verifica quando se faz a comparação do comportamento das equações (3.7) e (3.9), para um espaço vazio de 0.001 S/m de condutividade (valor típico para rocha), é que para distâncias pequenas e intervalos de tempo curtos, G_w e G_d diferem apreciavelmente. No entanto, este facto também permite mostrar que se aproximam assintoticamente para a condição:

$$(t^2 - \frac{R^2}{c^2})^{1/2} \geq \frac{2\varepsilon}{\sigma}; \quad (3.10)$$

Ora, a condição (3.10) é sempre satisfeita nas sondagens electromagnéticas transientes.

A função de Green representada em (3.7), G_w , propaga o sinal mais rápido, com velocidade da luz e o pico mais avançado do sinal é sempre singular mesmo quando a janela de tempo é muito curta, ou seja, quando a razão σ/ε é grande. O mesmo não é verdadeiro para a função G_d . Esta diferença entre as funções de Green afecta de forma significativa as propriedades numéricas da equação de difusão e da equação de onda amortecida. Devido também a esta diferença, os métodos de diferenças finitas explícitos para equações de onda amortecidas, apenas são estáveis (não amplificam erros de arredondamento) se o passo de tempo (Δt) e a distância entre pontos de grelha (Δ) satisfizerem a condição de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) para equações hiperbólicas (*Richtmyer and Morton, 1967*). No caso da equação (3.3) a condição CFL é dada por:

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Delta}{c}; \quad (3.11)$$

que condiciona o passo de tempo a ser menor que o tempo de propagação da velocidade da luz entre pontos de grelha.

No caso da função G_d , o máximo do sinal, a qualquer distância R , tem um tempo de chegada para:

$$t = \frac{\mu\sigma R^2}{4}; \quad (2.12)$$

Todo o sinal que chega depois do tempo dado pela equação (3.12) é exponencialmente menor e pode ser desprezado. Na realidade, pode demonstrar-se que o intervalo de tempo para a difusão numa grelha numérica a duas dimensões, com um espaçamento Δ , é dado por:

$$\Delta t_1 = \frac{\mu\sigma\Delta^2}{4}; \quad (3.13)$$

que usualmente se denomina por tempo de difusão de grelha (*Potter, 1973*).

Considere-se, em vez de G_d , a sua derivada radial negativa, dada por:

$$-\partial_R G_d = \frac{\mu I}{4\pi t} \frac{\mu\sigma R}{2t} e^{-\mu\sigma R^2/4t}; \quad (3.14)$$

que é o campo eléctrico induzido por uma fonte a duas dimensões da forma:

$$J_s(x, z, t) = -\mu I d R \delta'(R) [1 - H(t)], \quad (3.15)$$

onde $I d R$ é a força da fonte e $\delta'(R)$ é a derivada radial da função delta a duas dimensões, $\delta(x)\delta(z)$. A razão pela qual se considera uma fonte deste tipo está relacionada com o facto de o máximo espacial do seu campo eléctrico induzido, $-\partial_R G_d$, se movimentar para longe da origem à medida que o tempo

avança enquanto o máximo de G_d está sempre na origem. Para o tempo t , o máximo de $-\partial_R G_d$ está na posição radial dada por:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}}; \quad (3.16)$$

e move-se ao longo do condutor com uma velocidade dada por:

$$\partial_t R_{\max} = \sqrt{\frac{1}{2\mu\sigma}}; \quad (3.17)$$

que decresce com o tempo à medida que o campo eléctrico no condutor se torna suave. Ora, o abrandamento da taxa de difusão com o tempo, sugere que é possível, numa simulação numérica da difusão, aumentar o passo de tempo à medida que o tempo aumenta de acordo com uma equação da forma:

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta}{\partial_t R_{\max}} = (2\mu\sigma)^{1/2} \Delta; \quad (3.18)$$

A condição (3.18) é mais abrangente do que a primeira dada pela equação (3.13) visto que a resposta é, em primeiro lugar, governada por uma difusão rápida do campo eléctrico ao longo dos corpos menos condutores, mas mais tarde no tempo, é controlada pelo decaimento lento nos corpos mais condutores.

O método de DuFort-Frankel, utilizado para testar os vários modelos estudados neste trabalho, utiliza uma condição semelhante a (3.18), como se mostra no capítulo seguinte.

3.1.3 Equações de Diferenças Finitas

Para os termos espaciais, a equação de difusão numa grelha rectangular, a aproximação por diferenças finitas ou pelo método de integração, resulta num conjunto de equações discretas que são muito semelhantes (Oristaglio e Hohmann, 1984).

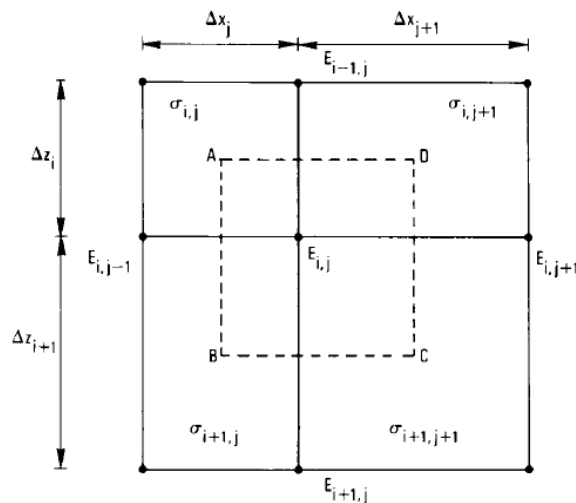


Fig. 7 – Ponto de grelha típico, $E_{i,j}$, numa grelha de diferenças finitas, rodeada pelos seus vizinhos e blocos de condutividade constante; ABCD é o rectângulo formado pelos centros dos blocos vizinhos de $E_{i,j}$ (Oristaglio e Hohmann, 1984)

Tendo em conta a figura 7, onde se pode observar um ponto típico de grelha, $E_{i,j}$, juntamente com os seus vizinhos mais próximos ($E_{i+1,j}$, $E_{i-1,j}$, $E_{i,j+1}$, $E_{i,j-1}$), e integrando segundo o rectângulo ABCD, vai obter-se, para os termos espaciais da equação de difusão:

$$\begin{aligned} \iint_{ABCD} dx dz \mu \sigma \partial_t E &= \iint_{ABCD} dx dz (\partial_{xx} E + \partial_{zz} E) = \\ &= \int_{BC} dx \partial_z E - \int_{AD} dx \partial_z E + \int_{DC} dz \partial_x E - \int_{AB} dz \partial_x E ; \end{aligned} \quad (3.19)$$

Os integrais da equação (3.19) podem ser aproximados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \iint_{ABCD} dx dz \mu \sigma \partial_t E &\approx \frac{\mu}{4} (\sigma_{i,j} \Delta z_i \Delta x_j + \sigma_{i+1,j} \Delta z_{i+1} \Delta x_j + \\ &+ \sigma_{i,j+1} \Delta z_i \Delta x_{j+1} + \sigma_{i+1,j+1} \Delta z_{i+1} \Delta x_{j+1}) \partial_t E_{i,j} ; \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\int_{BC} dx \partial_z E \approx \frac{(\Delta x_j + \Delta x_{j+1})}{2} \frac{(E_{i+1,j} - E_{i,j})}{\Delta z_{i+1}} ; \quad (3.21)$$

$$\int_{AD} dx \partial_z E \approx \frac{(\Delta x_j + \Delta x_{j+1})}{2} \frac{(E_{i,j} - E_{i-1,j})}{\Delta z_i} ; \quad (3.22)$$

$$\int_{DC} dz \partial_x E \approx \frac{(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})}{2} \frac{(E_{i,j+1} - E_{i,j})}{\Delta x_{j+1}} ; \quad (3.23)$$

$$\int_{AB} dz \partial_x E \approx \frac{(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})}{2} \frac{(E_{i,j} - E_{i,j-1})}{\Delta x_j} ; \quad (3.24)$$

Fazendo as substituições das equações (3.20) a (3.24) na equação (3.19) e rearranjando obtém-se:

$$\begin{aligned} \overline{\mu \sigma}_{i,j} \partial_t E_{i,j} &= \frac{1}{\Delta z_i \Delta z_{i+1}} \left(\frac{2 \Delta z_{i+1}}{\Delta z_i + \Delta z_{i+1}} E_{i-1,j} + \frac{2 \Delta z_i}{\Delta z_i + \Delta z_{i+1}} E_{i+1,j} - 2 E_{i,j} \right) + \\ &+ \frac{1}{\Delta x_j \Delta x_{j+1}} \left(\frac{2 \Delta x_{j+1}}{\Delta x_j + \Delta x_{j+1}} E_{i,j-1} + \frac{2 \Delta x_j}{\Delta x_j + \Delta x_{j+1}} E_{i,j+1} - 2 E_{i,j} \right) ; \end{aligned} \quad (3.25)$$

Onde $\overline{\mu \sigma}_{i,j}$ é a média pesada (pela área) das condutividades vizinhas de $E_{i,j}$ dada pela equação (3.26) e o lado direito é uma aproximação por diferenças finitas ao Laplaciano numa grelha irregular.

$$\frac{-}{\sigma_{i,j}} = \frac{\sigma_{i,j}\Delta z_i\Delta x_j + \sigma_{i+1,j}\Delta z_{i+1}\Delta x_j + \sigma_{i,j+1}\Delta z_i\Delta x_{j+1} + \sigma_{i+1,j+1}\Delta z_{i+1}\Delta x_{j+1}}{(\Delta z_i + \Delta z_{i+1})(\Delta x_j + \Delta x_{j+1})}; \quad (3.26)$$

O último passo para a discretização da equação de difusão é aproximar a derivada que está do lado esquerdo da equação (3.25) ($\partial_t E_{i,j}$). Para tal é necessário apresentar algumas características da discretização no tempo em aplicações geofísicas.

Tendo em conta que os modelos a analisar neste trabalho são modelos heterogéneos, a aplicação do método de Euler não é linear. Em especial porque a maioria dos modelos geofísicos contém corpos mais ou menos condutores e, por isso, tempos de difusão que variam fortemente perante a maior ou menor condutividade desses corpos. Tome-se como exemplo, uma esfera oca no espaço livre cujos modos naturais decaem em exponencial. O modo de decaimento mais lento tem uma constante de tempo dada por:

$$\tau_s = \frac{\mu\sigma_s^2}{\pi^2}; \quad (3.27)$$

sendo σ a condutividade da esfera e r_s o raio da mesma. No caso de se considerar um bloco rectangular (2D), de lados L_x e L_z (\bar{L}^2 é a soma harmónica do quadrado de L_x e L_z), a constante de tempo de decaimento vem:

$$\tau_{2D} = \frac{\mu\sigma\bar{L}^2}{\pi^2}; \quad (3.28)$$

Ambas as constantes de decaimento (equações (3.27) e (3.28)) dão valores na ordem dos milissegundos para corpos ocos típicos. Isto implica que, com o método de Euler, seja necessário um enorme número de passos de tempo para calcular a resposta do corpo oco num semi-espaço.

Existem diversos esquemas de diferenças finitas incondicionalmente estáveis que se podem aplicar à equação de difusão. A escolha do esquema está dependente do intervalo de tempo que se quer que tenha resultados mais precisos. Se os tempos longos forem os de maior importância, então os métodos implícitos são os métodos mais vantajosos. No entanto, se os resultados para as primeiras chegadas são importantes, então o passo de tempo definido é importante para a obtenção de bons resultados no cálculo da resposta. É necessário utilizar uma equação do tipo:

$$\Delta t_{\max} = \frac{\mu \min(\bar{\sigma}_{i,j})\Delta^2}{4}; \quad (3.29)$$

Que permite acompanhar de forma adequada a rápida difusão do campo eléctrico para os primeiros tempos de chegada para corpos com valores pequenos de condutividade. Na equação (3.29), $\min(\bar{\sigma}_{i,j})$ é o valor mais baixo de condutividade no modelo e Δt_{\max} é o passo de tempo máximo possível para aquela condutividade e espaçamento da grelha.

Sendo necessário um passo de tempo que varia à medida que o cálculo avança, o método de DuFort-Frankel é, segundo *Oristaglio e Hohmann (1984)*, o mais adequado para os casos que se pretende estudar. É um método que é incondicionalmente estável e explícito e, por isso, mais simples de programar.

De forma a obter a estabilidade incondicional do método, tal como em muitos outros, faz-se a adição de um termo hiperbólico à equação de difusão. Para além disso, o método de DuFort-Frankel passa por

uma pequena alteração do método de Euler. Assim, considere-se uma aproximação por diferenças centradas:

$$\partial_t E_{i,j}^n \approx \frac{E_{i,j}^{n+1} - E_{i,j}^{n-1}}{2\Delta t} + O(\Delta t^2); \quad (3.30)$$

Na equação (3.30), o índice indica o valor do campo eléctrico para o tempo $t=n\Delta t$. Esta equação, combinada com a equação (3.31), permite obter um método incondicionalmente estável quando, posteriormente, substituída na equação (3.32).

$$E_{i,j}^n \approx \frac{E_{i,j}^{n+1} + E_{i,j}^{n-1}}{2} + O(\Delta t^2); \quad (3.31)$$

$$\partial_t E_{i,j}^n = \frac{E_{i+1,j}^n + E_{i-1,j}^n + E_{i,j+1}^n + E_{i,j-1}^n - 4E_{i,j}^n}{\mu\sigma_{i,j}\Delta^2}; \quad (3.32)$$

Numa grelha regular e segundo o método clássico de DuFort-Frankel tem-se:

$$\frac{E_{i,j}^{n+1} + E_{i,j}^{n-1}}{2\Delta t} = \frac{E_{i+1,j}^n + E_{i-1,j}^n + E_{i,j+1}^n + E_{i,j-1}^n - 2(E_{i,j}^{n+1} + E_{i,j}^{n-1})}{\mu\sigma_{i,j}\Delta^2}; \quad (3.33)$$

Resolvendo (3.33) para $E_{i,j}^{n+1}$ tem-se:

$$E_{i,j}^{n+1} = \frac{1-4r_{i,j}}{1+4r_{i,j}} E_{i,j}^{n-1} + \frac{2r_{i,j}}{1+4r_{i,j}} (E_{i+1,j}^n + E_{i-1,j}^n + E_{i,j+1}^n + E_{i,j-1}^n); \quad (3.34)$$

onde $r_{i,j}$ é a razão de grelha, quantidade adimensional, dada por:

$$r_{i,j} = \frac{\Delta t^2}{\mu\sigma_{i,j}\Delta^2}; \quad (3.35)$$

A equação (3.33) é a fórmula clássica de diferenças finitas para a equação de amortecimento de onda:

$$\frac{2\Delta t^2}{\Delta^2} \partial_{tt} E + \mu\sigma \partial_t E = \partial_{xx} E + \partial_{zz} E; \quad (3.36)$$

onde o coeficiente do termo hiperbólico, $\partial_{tt} E$, depende do espaçamento de grelha.

A estabilidade do método está então dependente da condição CFL (*Richtmyer e Morton, 1967*), já referida, para equações cuja fórmula generalizada é:

$$\nu^{-2} \partial_{tt} E + a^{-2} \partial_t E = \partial_{xx} E + \partial_{zz} E; \quad (3.37)$$

Onde ν é a velocidade da onda e a é a constante de difusão. Tal como mencionado no capítulo anterior, a condição CFL implica que um método explícito só é estável para este tipo de equação hiperbólica se a distância (Δ), o passo de tempo (Δt) e a velocidade de onda (ν) satisfizerem:

$$\nu \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Delta}{\Delta t}; \quad (3.38)$$

Comparando as equações (3.36) e (3.37), observa-se que tanto ν como a estão definidos para este caso mais particular. O que implica que, neste caso, a condição CFL é sempre satisfeita pela aplicação do método de DuFort-Frankel. No entanto, é preciso ter em atenção que, para este tipo de solução, as características de comportamento ondulatório podem dominar as características difusivas caso o passo de tempo seja muito grande. Ora, no capítulo anterior fez-se uma análise da função de Green e como esta se pode aplicar neste caso. Assim, a função de Green para a equação (3.36) deduz-se directamente da equação (3.7) fazendo:

$$\varepsilon = \frac{1}{\mu c^2} = \frac{2\Delta t^2}{\mu \Delta^2}; \quad (3.39)$$

A equação (3.10), que indica a condição para a qual ambas as equações de Green têm um comportamento assintótico, define que o comportamento difusivo vai dominar a equação (3.36) para:

$$t \geq \frac{4\Delta t^2}{\mu \sigma \Delta^2}; \quad (3.40)$$

Tendo em conta estas condições, o método de DuFort-Frankel, deverá apresentar resultados cada vez mais precisos para a equação de difusão, à medida que a condição apresentada em (3.40) é satisfeita para valores de tempo cada vez maiores. Se se resolver a igualdade da condição (3.40) em ordem a Δt obtém-se uma estimativa do máximo, do ponto de vista prático, do passo de tempo a utilizar com o método de DuFort-Frankel:

$$\Delta t_{\max} = (\mu \sigma)^{1/2} \frac{\Delta}{2}; \quad (3.41)$$

Verifica-se assim que o método a aplicar permite passos de tempo elevados se apenas for necessária precisão para os tempos longos ou para valores altos de t . Para se ter precisão nos tempos próximos, a condição (3.41) dá tempos de difusão de grelha comuns fazendo $t = \Delta t$.

O método de DuFort-Frankel é facilmente generalizável para grelhas irregulares, como a utilizada neste trabalho. Para tal, faz-se a substituição das equações (3.29) e (3.30) na equação (3.26), obtendo um resultado semelhante à equação (3.33) se se definir os seguintes espaçamentos de grelha médios:

$$\overline{\Delta z_i} = \frac{\Delta z_{i+1} + \Delta z_i}{2}; \quad (3.42)$$

$$\overline{\Delta x_j} = \frac{\Delta x_{j+1} + \Delta x_j}{2} ; \quad (3.43)$$

e também as razões de grelha locais para a difusão em x, z e médio, respectivamente:

$$r_{i,j}^z = \frac{\Delta t}{\overline{\mu\sigma_{i,j}} \Delta z_i \Delta z_{i+1}} ; \quad (3.44)$$

$$r_{i,j}^x = \frac{\Delta t}{\overline{\mu\sigma_{i,j}} \Delta x_j \Delta x_{j+1}} ; \quad (3.45)$$

$$\overline{r_{i,j}} = \frac{r_{i,j}^x + r_{i,j}^z}{2} ; \quad (3.46)$$

A generalização da equação pelo método de DuFort-Frankel ficará então:

$$\begin{aligned} E_{i,j}^{n+1} = & \frac{1 - 4\overline{r_{i,j}}}{1 + 4\overline{r_{i,j}}} E_{i,j}^{n-1} + \frac{2\overline{r_{i,j}}}{1 + 4\overline{r_{i,j}}} \left(\frac{\Delta z_i}{\Delta z_i} E_{i+1,j}^n + \frac{\Delta z_{i+1}}{\Delta z_i} E_{i-1,j}^n \right) + \\ & + \frac{2\overline{r_{i,j}}}{1 + 4\overline{r_{i,j}}} \left(\frac{\Delta x_j}{\Delta x_j} E_{i,j+1}^n + \frac{\Delta x_{j+1}}{\Delta x_j} E_{i,j-1}^n \right) ; \end{aligned} \quad (3.47)$$

A aplicação da equação (3.47) em conjunto com as condições fronteira e iniciais que serão descritas no capítulo seguinte, são as equações fundamentais que foram aplicadas no código utilizado para gerar os resultados obtidos em cada um dos modelos estudados neste trabalho.

3.1.4 Condições Fronteira

Do ponto de vista do campo eléctrico e do respectivo gradiente, tendo em conta que se trata do método transiente a duas dimensões, verifica-se que este é contínuo em todas as fronteiras a considerar sendo que não é necessário ter em atenção esta componente. No entanto, é necessário ter em atenção as fronteiras Terra-Ar e base do modelo do ponto de vista das condições de radiação.

Considerando, em primeiro lugar, a interface Terra-Ar, com a aproximação quasi-estática, o campo eléctrico satisfaz a equação de Laplace:

$$\partial_{xx} E + \partial_{zz} E = 0 ; \quad (3.48)$$

Assim, o campo eléctrico no ar ($E(x, z < 0, t)$) pode ser calculado a partir do valor na interface Terra-Ar ($E(x, z=0, t)$) por um prolongamento para cima. A equação que traduz esse prolongamento define-se:

$$E(x, z < 0, t) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dK_x e^{iK_x z + iK_x x} \tilde{E}(K_x, z=0, t) ; \quad (3.49)$$

onde $\tilde{E}(K_x, z=0, t)$ é a transformada de Fourier do campo eléctrico na interface Terra-Ar dada por:

$$\tilde{E}(K_x, z=0, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-iK_x x} E(x, z=0, t) ; \quad (3.50)$$

Quando o integral de Fourier, apresentado na equação (3.49), é uniformemente convergente, tem-se a seguinte implicação para $z=0$:

$$\left(\frac{\partial}{\partial n} + |K_x| \right) \tilde{E} = 0 ; \quad (3.51)$$

A condição apresentada em (3.51) é a mesma condição fronteira que se tem para a derivada normal do campo no domínio da frequência espacial (∂n é a derivada normal que aponta para fora de forma a que $\partial_n = \partial_z$ para $z=0$). Fazendo:

$$|K_x| = (iK_x)[-isign(K_x)] ; \quad (3.52)$$

Obtém-se a condição fronteira (3.53) no domínio do espaço, para $z=0$, a partir da transformada inversa de Fourier da equação (3.50):

$$\partial_n E(x, z=0, t) + \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} dx' \frac{\partial_x E(x', z=0, t)}{x - x'} = 0 ; \quad (3.53)$$

Esta condição fronteira para a derivada normal de \mathbf{E} , relaciona-se com a transformada de Hilbert da sua derivada tangencial (P , define-se como o integral do valor principal).

A condição fronteira dada pela equação (3.53) tem uma aproximação numérica que passa por, no primeiro passo de tempo, o campo eléctrico, em $z=0$, ser dado pelas condições iniciais e a equação (3.48), calculando o campo a uma distância Δz da interface. Uma vez obtidos estes valores, a equação de diferenças finitas, (3.47), é utilizada para fazer o avanço do campo em $z=0$ para o passo de tempo seguinte.

A imposição de uma condição fronteira na base do modelo não tem uma solução de fácil aplicação numérica pelo que se optou por utilizar uma grelha alargada à medida que se avança em profundidade por forma a afastar a fronteira da região da fonte do campo e definiram-se os valores para a base e fronteiras laterais iguais à solução para um semi-espaço que deverá ser válida para distâncias grandes.

4. Avaliação do erro médio dos modelos

Em primeiro lugar procedeu-se ao cálculo do erro médio cometido pelo programa. Para tal, foram gerados um conjunto de modelos de meios homogêneos, cujas curvas de resistividade aparente deverão ser, teoricamente, curvas lineares constantes cujo valor de resistividade será igual ao valor do meio, quer em função do tempo, quer em função da distância.

Foram gerados 6 modelos teste, no total, com resistividades que variam entre os 50 $\Omega\cdot m$ e os 300 $\Omega\cdot m$. Todos os modelos teste gerados têm uma geometria em *offset*, com 1 transmissor e 15 receptores (Tabela 1).

$$Erro(\rho_a)(\%) = \frac{\rho_{obtido} - \rho_{teórico}}{\rho_{teórico}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$Erro_{médio}(\%) = \frac{\sum Erro(\rho_a)}{n} \quad (4.2)$$

A equação (4.1) traduz o cálculo dos valores de erro que são apresentados na 5ª coluna da tabela 2. A equação (4.2) traduz o cálculo do erro médio para cada um dos modelos teste.

Tabela 1 – Características dos 6 modelos teste criados com geometria *offset*

Nome do ficheiro	Dimensões do modelo (m)	Celulas em X (m)	Celulas em Z (m)	Nº de Tx	Nº de Rx	Resistividade ($\Omega\cdot m$)	Nº de passos de tempo	Tempos (s)
homo50.txt	7100 de comprimento (X) 2855 de profundidade (Z)	15 celulas de 240	53 celulas de 10	1	15	50	9	0,000000007 ;
homo100.txt		8 celulas de 120	5 celulas de 15			100		0,000000001 ;
homo150.txt		10 celulas de 60	5 celulas de 30			150		0,000000005 ;
homo200.txt		12 celulas de 30	5 celulas de 60			200		0,000000015 ;
homo250.txt		16 celulas de 15	5 celulas de 120			250		0,000000475 ;
homo300.txt		134 celulas de 10 Total de 195 celulas	5 celulas de 240 Total de 78 celulas			300		0,000001625 ; 0,000005025 ; 0,000010225 ; 0,00002

Tabela 2 – Análise do erro para o modelo de meio homogêneo de 250 $\Omega\cdot m$, em geometria *offset*

Ficheiro	AR Teórica ($\Omega\cdot m$)	AR Obtida ($\Omega\cdot m$)	Erro de AR ($\Omega\cdot m$)	Erro de AR (%)	Erro médio (%)
homo200.txt	971,95	227,60	-744,35	-76,58	-21,79
	746,43	221,80	-524,63	-70,29	
	394,22	208,20	-186,02	-47,19	
	240,51	202,50	-38,01	-15,80	
	212,15	205,40	-6,75	-3,18	
	203,08	204,20	1,12	0,55	
	200,96	205,30	4,34	2,16	
	200,63	202,90	2,27	1,13	
	200,58	226,90	26,32	13,12	

Como se pode observar na tabela 2, o erro médio cometido, tendo em conta todos os tempos do modelo, no cálculo dos valores de resistividade efectiva é de 21.79%, em valor absoluto, para o modelo de meio homogéneo de 250 Ω .m. O erro médio para os restantes 5 modelos testados é da mesma ordem de grandeza, sendo que para 300 Ω .m, o erro apresenta-se um pouco mais alto.

A razão pela qual o erro apresentado é tão elevado deve-se ao mau ajuste para os primeiros 3 tempos sendo que para os tempos mais longos o ajuste sofre uma melhoria significativa. Este fenómeno enquadra-se perfeitamente no comportamento característico de uma curva de resistividade aparente em função do tempo, onde os primeiros tempos recolhidos têm sempre uma queda abrupta. Isto acontece devido às variações muito rápidas do campo electromagnético que é induzido e de, para estes tempos se estar tão próximo da fonte, local onde a simulação da propagação do campo é muito difícil. No entanto, este efeito não invalida de modo nenhum a eficácia do modelo visto que o comportamento demonstrado para os 6 modelos testados, para além de ser equivalente, tende de forma linear para o valor de resistividade efectiva do meio.

4.1 Modelo de semi-espaco com condutor vertical (alto contraste)

Para concluir a validação do método numérico utilizado, procedeu-se à reprodução de um dos modelos apresentados no artigo que suporta este trabalho (*Oristaglio e Hohmann, 1984*).

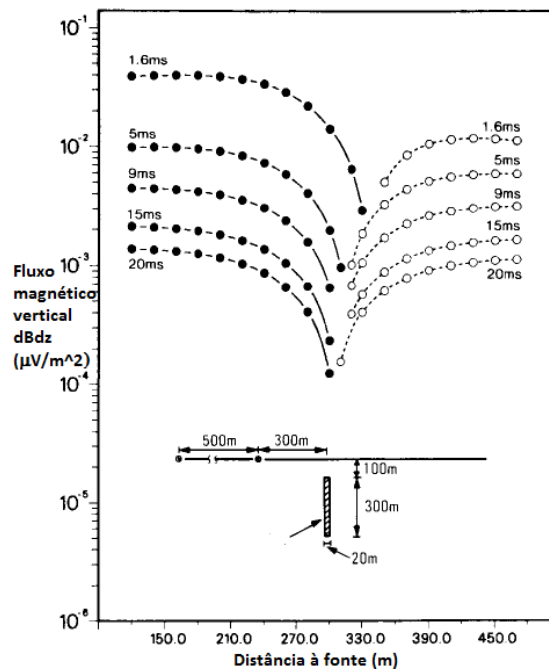


Fig. 8 - Perfis do fluxo magnético vertical (dBdz) para um semi-espaco condutor com um contraste de 1:1000. A geometria do modelo apresenta-se na base da figura (*Oristaglio e Hohmann, 1984*)

Na figura 8, apresenta-se o modelo e os resultados que se pretendem obter com o método numérico utilizado neste trabalho. O modelo apresentado tem uma geometria *offset*, com um *loop* transmissor de 500 m de lado e um conjunto de receptores que se vão afastando progressivamente desse transmissor. O condutor apresentado, encontra-se a 300 m de distância do *loop* transmissor na direcção x e a 100 m de profundidade. O condutor tem uma resistividade de 0.3 Ω .m, 300 m de comprimento e 20 m de largura. O meio em que se encontra tem uma resistividade de 300 Ω .m.

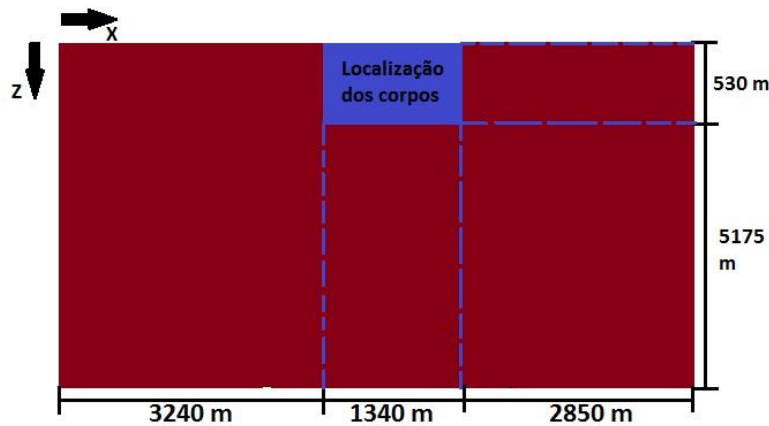


Fig. 9 – Dimensões gerais de todos os modelos utilizados neste trabalho. A zona a azul é a zona de interesse, onde estão os corpos anisotrópicos e onde as células têm dimensões regulares de 10x10 m. A zona a castanho é constituída pelas restantes células de dimensões irregulares que variam entre 15 e 240 m em x e z.

Na figura 9, ilustram-se as dimensões de todos os modelos criados neste trabalho. A zona a azul, é constituída por células de dimensão regular de 10x10 m, e é a zona onde foram colocados os corpos anisotrópicos e os transmissores e receptores das duas geometrias utilizadas. Na figura 10, apresenta-se, em maior detalhe, a localização de cada um dos receptores para cada uma das geometrias utilizadas.

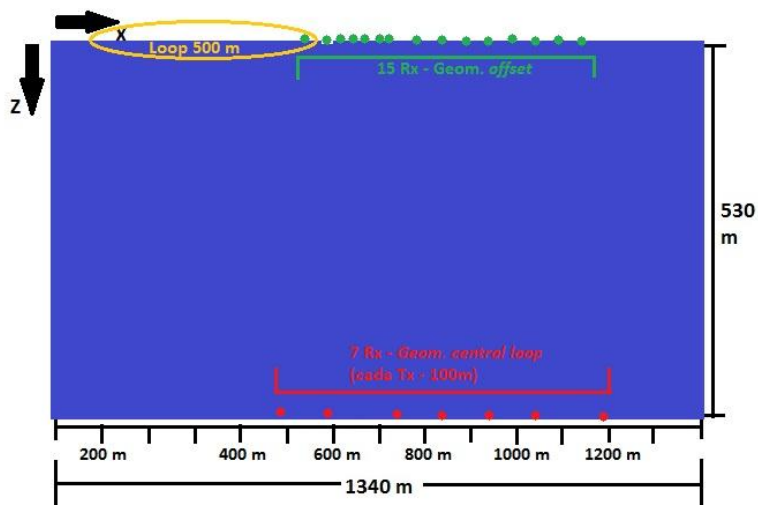


Fig. 10 – Localização dos transmissores e receptores para cada geometria utilizada. (Verde – geometria *offset*; Vermelho – geometria *central loop*)

Assim, de acordo com as distâncias apresentadas na figura 10 para os receptores de ambas as geometrias e para os nove tempos apresentados na tabela 1, foi possível obter os resultados, para o fluxo magnético vertical, apresentados na figura 11, para o modelo da figura 8, reprodução do artigo de *Oristaglio e Hohmann (1984)*.

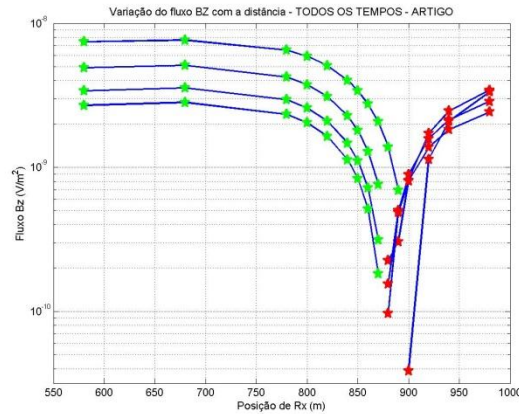


Fig. 11 – Variação do fluxo magnético vertical (dBdz), para cada tempo considerado, com a posição dos receptores para o modelo apresentado na figura 8, com geometria *offset*

Comparando os resultados apresentados no artigo (fig. 8) e os resultados apresentados na figura 11, verifica-se que se obtém o mesmo comportamento do fluxo magnético vertical, havendo uma queda e uma inversão do sinal do valor de fluxo quando o campo magnético induzido no solo atinge o condutor. Verifica-se que para os primeiros tempos, há um avanço do pico em relação à verdadeira posição horizontal do condutor (900 m), mas que à medida que os tempos considerados são maiores, esse pico vai regredindo progressivamente até à verdadeira posição do condutor. Do ponto de vista dos valores do fluxo magnético, estes encontram-se na mesma ordem de grandeza, sendo que na fig. 8 os valores estão em $\mu\text{V}/\text{m}^2$ e na figura 11 em V/m^2 .

Assim, com os resultados obtidos, verifica-se que o método numérico utilizado neste trabalho, se adequa ao estudo que se pretende fazer.

5. Apresentação de resultados

Ao longo deste trabalho, foram gerados, 72 modelos para a geometria de *central loop* e 72 modelos para a geometria de *offset*, sendo no total 142 modelos. Do ponto de vista de disposição e valores de resistividade dos corpos anisotrópicos, contam-se 18 modelos diferentes, 6 com uma disposição vertical, 6 com uma disposição horizontal e 6 com uma disposição diagonal. Em cada um desses 6 modelos, estão 4 modelos em que se varia o valor de resistividade dos corpos. Um primeiro modelo com a resistividade dada a cada um dos corpos colocados, o segundo modelo com um corpo de área igual à ocupada pelos corpos do primeiro modelo com uma resistividade média (com sufixo “rom”), o terceiro modelo (com o sufixo rox) e o quarto modelo (com sufixo roz) com um corpo também de área igual à ocupada pelos corpos singulares e com uma resistividade na direcção x e uma resistividade na direcção z, respectivamente. Em anexo, apresenta-se as tabelas A1 a A6 com as características de todos os modelos gerados para cada uma das geometrias.

Tendo em conta que as opções de tipos de modelos são diversas e que foram tidas em conta duas geometrias diferentes, não seria viável apresentar neste trabalho todos os modelos gerados. Assim, os modelos mais relevantes serão apresentados neste capítulo, sendo que algumas das figuras geradas se encontram em anexo. Alguns dos modelos trabalhados apenas se encontram disponíveis na versão digital deste trabalho.

5.1 Anisotropia Horizontal

Tabela 3 – Características dos 4 modelos a analisar com disposição horizontal, para a geometria de *central loop*.

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci,ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx / Rx	Posição dos loops (nli, nlf / nLRx)
17HOR10D300L10C.txt	17 condutores	100, 130, 10, 43	300, 10	10	300	0.3	7	(75, 85, 80) (85, 95, 90) (100, 110, 105) (110, 120, 115) (120, 130, 125) (130, 140, 135) (145, 155, 150)
1HOR10D300L10Crom.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		9,4868		
1HOR10D300L10Crox.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		0,6182		
1HOR10D300L10Croz.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		145,5945		

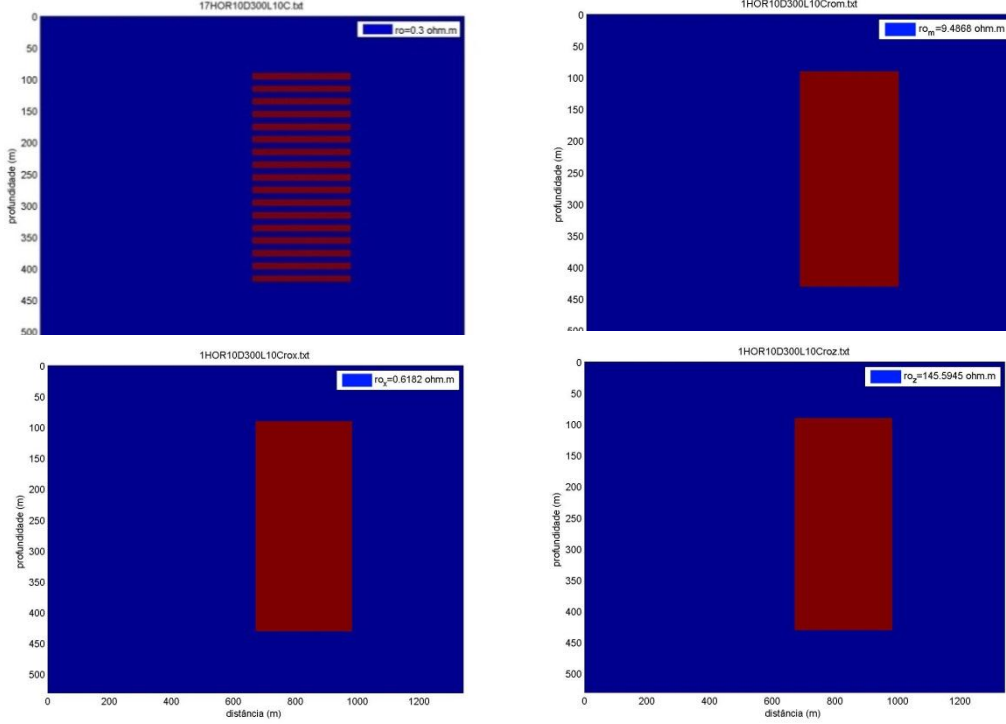


Fig. 12 – Modelos com corpos dispostos horizontalmente, igualmente espaçados, em meio homogêneo de 300 Ω.m e geometria *central loop*. Canto superior esquerdo - 17HOR10D300L10C.txt (tabela 3 – 1); Canto superior direito - 1HOR10D300L10Crom.txt (tabela 3 – 2); Canto inferior esquerdo – 1HHOR10D300L10Crox.txt (tabela 3 – 3); Canto inferior direito – 1HOR10D300L10Croz.txt (tabela 4 – 4)

Na tabela 3 e figura 12, apresentam-se as características e as imagens dos modelos a analisar neste capítulo. Como se pode observar, o primeiro modelo a analisar, é constituído por um conjunto de 17 condutores com uma espessura de 10 m e um comprimento de 300 m. Estão espaçados de 10 m e a resistividade nesse espaçamento é igual à do meio (300 Ω.m). Os outros 3 modelos, são constituídos por um único corpo, cujas dimensões são iguais à soma das dimensões dos condutores do primeiro modelo mais o espaçamento que há entre eles. Quanto à resistividade do corpo, corresponde à resistividade média, transversal (z) e longitudinal (x), calculada a partir das formulas (5.1), (5.2) e (5.3).

$$\rho_{long} = p\rho_1 + (1-p)\rho_2 \quad (5.1)$$

$$\rho_{trans} = \frac{\rho_1\rho_2}{p\rho_1 + (1-p)\rho_2} \quad (5.2)$$

$$\rho_{médio} = \sqrt{\rho_1\rho_2} \quad (5.3)$$

As equações (5.1), (5.2) e (5.3), permitem calcular as resistividades efectivas numa dada direcção. A equação (5.1) traduz a resistividade efectiva na direcção longitudinal, neste caso, a direcção x, a equação (5.2) a resistividade efectiva na direcção transversal (z) e a equação (5.3) é a resistividade média dos corpos existentes na secção, para a área total que estes ocupam. O valor de p define-se como a fracção, em área, ocupada por um corpo ou conjunto de corpos com uma dada resistividade.

Para cada um dos modelos gerados, foram analisados resultados da resistividade aparente (ρ_a) e do fluxo magnético vertical (dBdz) com o tempo e com a posição dos receptores. Em cada figura analisada, encontram-se sempre 4 curvas distintas. Uma para o modelo com vários condutores, uma com o modelo com um único corpo com o valor de resistividade efectiva na direcção x, seguidamente uma correspondente ao modelo com um único corpo com a resistividade efectiva na direcção z e, por último, uma curva que corresponde ao modelo com um único corpo com a resistividade média presente no modelo.

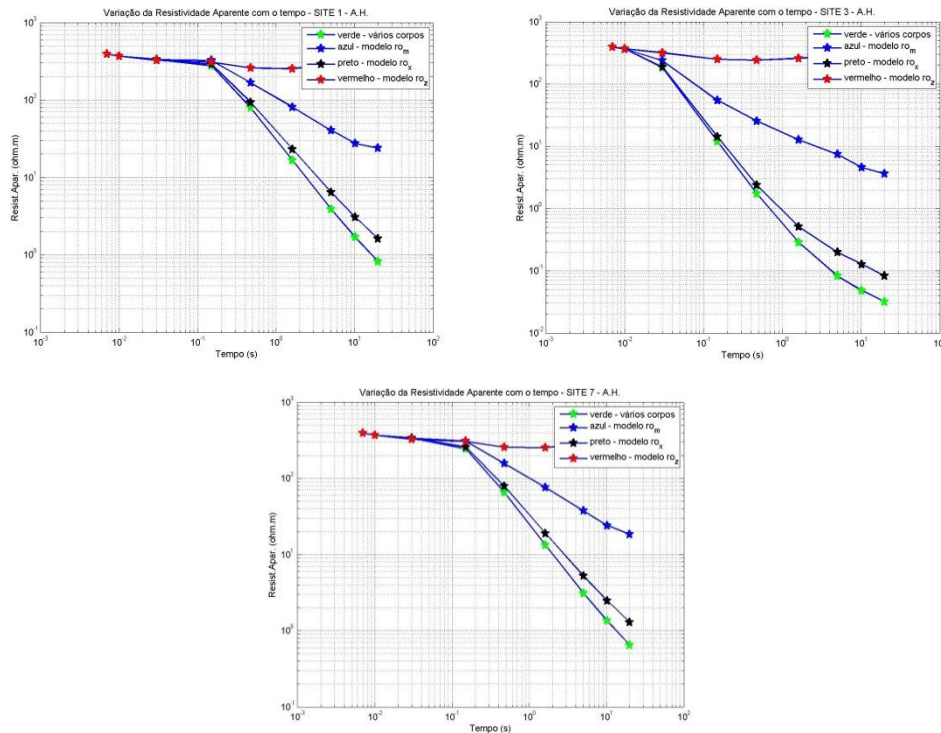


Fig. 13 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s), para os modelos apresentados na figura 12, geometria de *central loop*. Canto superior esquerdo – Site 1 (antes das estruturas condutoras); Canto superior direito – Site 3 (início das estruturas condutoras); base – Site 7 (após as estruturas condutoras)

Na figura 13, apresenta-se a resistividade efectiva em função do tempo para os sites 1, 3 e 7, que correspondem a sondagens feitas antes das estruturas condutoras, no início das estruturas condutoras e após as estruturas condutoras, para a geometria *central loop*.

Em primeiro lugar, verifica-se que o método aplicado neste trabalho identifica condutores com uma espessura de 10 m e com um espaçamento entre eles também de 10 m. Outro ponto importante é a proximidade entre as curvas assinaladas a verde e a preto. Essas duas curvas correspondem, respectivamente, ao modelo com vários corpos anisotrópicos horizontais com um espaçamento de 10 m entre eles e ao modelo com um corpo único, com área equivalente à ocupada pelo conjunto dos corpos, com o valor de resistividade longitudinal. Esta proximidade e, por outro lado, o claro afastamento das outras curvas, indica que o método utilizado identifica de forma clara uma direcção preferencial da condução de corrente na secção estudada e que, neste caso, essa direcção preferencial corresponde à direcção de maior extensão dos condutores, a direcção x.

Verifica-se que a ordem de grandeza dos valores para o site 1 e 7 são equivalentes, variando entre $10^{2.3}$ e $10^0 \Omega.m$ que no site 3 a variação é para um intervalo maior, sendo o mínimo de resistividade $10^{-1.8} \Omega.m$. Ora, tendo em conta a localização dos sites relativamente à localização horizontal das estruturas condutoras (descrita no paragrafo anterior), tanto em termos de valores de resistividade efectiva como em termos de comportamento das curvas, é possível definir a localização das estruturas condutoras e valores de resistividade.

Em anexo, tem-se a figura B1 para sites equivalentes aos apresentados na figura 13 mas para uma geometria *offset*. As restantes figuras respeitantes aos modelos estudados e analisados durante este trabalho, encontram-se disponíveis apenas na versão digital.

Tabela 4 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos apresentados na figura 12 e tabela 3, para a geometria *central loop*.

MÉDIAS SITE A SITE			
SITE	$\rho_a / \rho_a(\text{médio}) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(x) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(z) (\%)$
1	643.86	33.92	8384.07
2	1728.84	49.23	96254.73
3	3990.80	67.19	350668.10
4	310798.36	73.04	643723.56
5	4662.20	70.77	218107.40
6	1760.53	47.51	131057.11
7	684.69	35.64	9930.00

Tabela 5 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos apresentados na figura 12 e tabela 3, para a geometria *central loop*.

MÉDIAS A CADA TEMPO			
Tempo (ms)	$\rho_a / \rho_a(\text{médio}) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(x) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(z) (\%)$
0.00700	0.00	0.00	0.00
0.01000	0.03	0.00	0.11
0.03000	16.48	1.22	39.60
0.15000	206.65	13.91	1152.70
0.47500	745.19	29.19	8407.90
1.62500	2701.52	58.75	59562.57
5.02500	16916.38	100.44	251668.44
10.22000	82079.42	127.64	516612.92
20.00000	314251.98	153.97	1037287.88

As tabelas 4 e 5 fazem a comparação, em percentagem e para a geometria de *central loop*, do modelo com vários corpos condutores e cada um dos 3 modelos com resistividade efectiva média, longitudinal e transversal, apresentados na figura 12. Os valores que se apresentam nestas tabelas, são calculados a partir das equações (4.1) e (4.2). Pelos valores de ambas as tabelas, verifica-se que o modelo com resistividade longitudinal (direcção x) é sempre o modelo mais próximo do modelo com vários condutores horizontais. Essa proximidade é sempre por excesso, ou seja, o modelo com um único bloco horizontal e condutor, tem sempre valores mais altos de resistividade aparente do que o modelo com vários corpos condutores. O facto de o valor de resistividade aparente ser um pouco mais elevado que o valor da resistividade aparente dos vários condutores e de o bloco único ter dimensões, na totalidade, maiores que o conjunto dos vários condutores, poderão explicar esta proximidade por excesso.

Através da tabela 4, pode observar-se que a proximidade entre os dois modelos piora à medida que os receptores estão mais próximos dos corpos condutores. Este facto vem reforçar que as características ligeiramente diferentes do modelo, têm influência significativa na coincidência dos dois modelos. Já na tabela 5, verifica-se que a proximidade entre modelos piora à medida que temos tempos mais longos. Neste caso, não só as pequenas diferenças entre modelos terá influência, mas a forma como o

campo electromagnético se difunde nos dois casos também não será igual, provocando um distanciamento entre os modelos.

Em anexo, encontram-se as tabelas A7 e A8, correspondentes às tabelas 4 e 5, para os mesmos modelos, mas em geometria offset. As tabelas respeitantes aos restantes modelos estudados e analisados ao longo deste trabalho, encontram-se disponíveis apenas na versão digital.

5.2 Anisotropia Vertical

Tal como no capítulo 5.1, para a anisotropia horizontal, neste capítulo não se vão apresentar a totalidade dos resultados obtidos, sendo que alguns se encontraram nos anexos e outros apenas estarão disponíveis em versão digital. No entanto, opta-se neste caso por analisar em mais detalhe os modelos com corpos verticais, cuja resistividade efectiva varia entre muito resistiva e muito condutora. Os corpos verticais condutores têm uma resistividade de $0.3 \Omega.m$ e os corpos verticais resistivos têm uma resistividade de $3000 \Omega.m$. Na figura 15, apresenta-se os modelos que serão mais detalhados neste capítulo. A tabela 6, contem as características fundamentais desses mesmos modelos com disposição vertical que foram analisados ao longo deste trabalho.

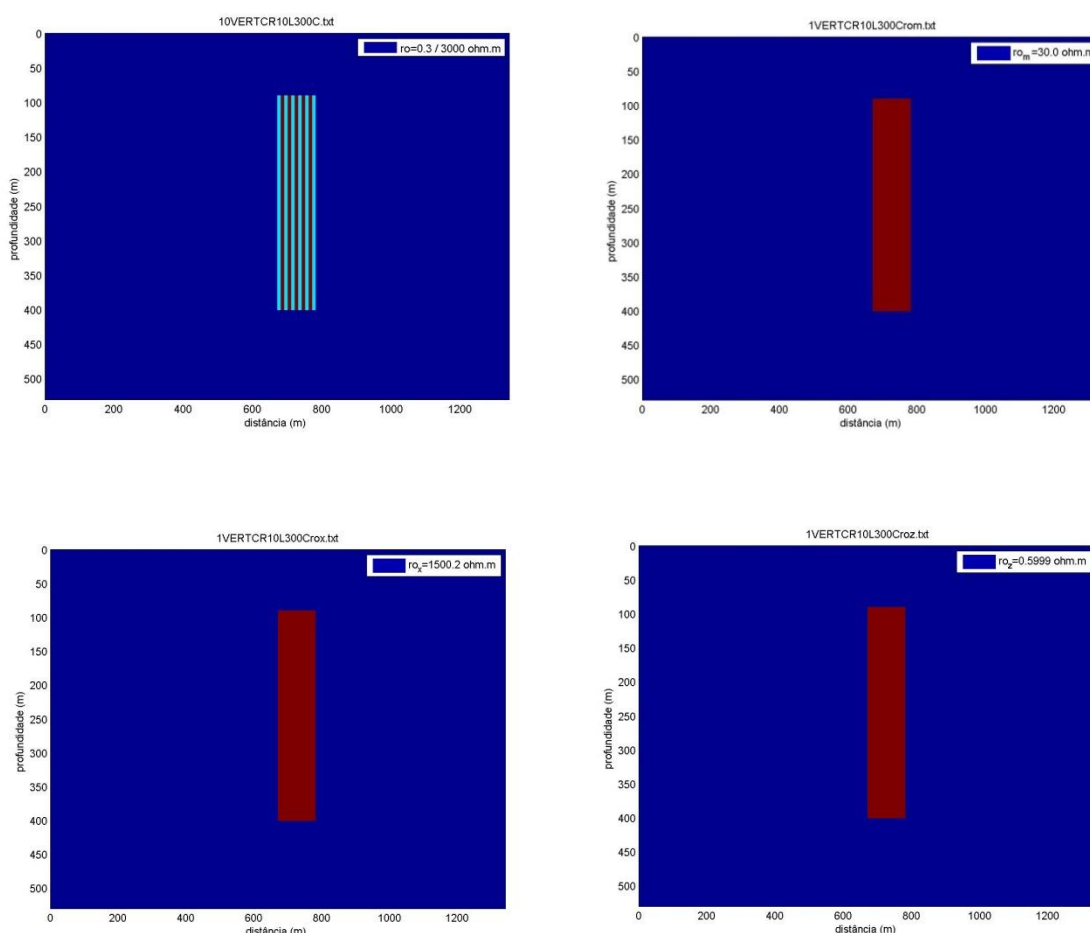


Fig. 14 – Modelo com corpos condutores (azul claro) intercalados com corpos resistivos (castanho), em meio homogéneo de $300 \Omega.m$ e geometria de *central loop*. Canto superior esquerdo – 10VERTCR10L300C.txt (tabela 6 – 1); Canto superior direito – 1VERTCR10L300Crom.txt (tabela 6 – 2); Canto inferior esquerdo – 1VERTCR10L300Crox.txt (tabela 6 – 3); Canto inferior direito . 1VERTCR10L300Croz.txt (tabela 6 – 4)

Tabela 6 – Características dos 4 modelos analisados, para a geometria *central loop*, com disposição vertical

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci,ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx/Rx	Posição dos loops (nli, nlf / nIRx)
10VERTCR10L300C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 110, 10, 40	10, 300	0	300	0.3 / 3000	7	(75, 85, 80)
1VERTCR10L300Crom.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		30.0000		(85, 95, 90)
1VERTCR10L300Crox.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		1500.2000		(100, 110, 105)
1VERTCR10L300Croz.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		0.5999		(110, 120, 115)
								(120, 130, 125)
								(130, 140, 135)
								(145, 155, 150)

Os modelos a analisar com mais detalhe são 10VERTCR10L300C.txt, 1VERTCR10L300Crom.txt, 1VERTCR10L300Crox.txt e 1VERTCR10L300Croz.txt, que correspondem às características descritas na tabela 6 e às imagens apresentadas na figura 14. Tal como na anisotropia horizontal, os modelos com os sufixos “rom”, “rox” e “roz”, correspondem a modelos com um único bloco que ocupa a mesma área que o conjunto dos condutores do modelo 10VERTCR10L300L.txt, apresentado na figura 15, e cuja resistividade efectiva é calculada a partir das equações (5.1), (5.2) e (5.3).

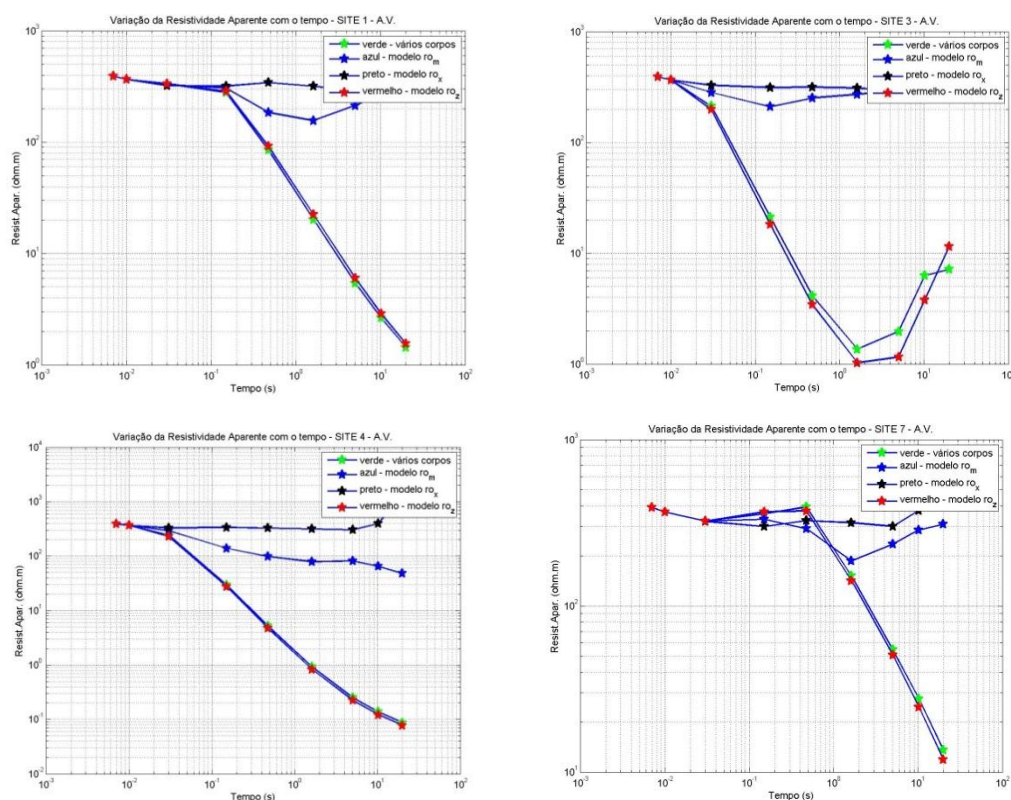


Fig. 15 – Resistividade aparente (Ω .m) em função do tempo (s) para os modelos apresentados na figura 15. Canto superior esquerdo – Site 1 (antes das estruturas condutoras); Canto superior direito – Site 3 (início das estruturas condutoras); Canto inferior esquerdo – Site 4 (fim das estruturas condutoras); Canto inferior direito – Site 7 (após as estruturas condutoras)

Na figura 15, pode observar-se a resistividade aparente em função do tempo para os sites 1, 3, 4 e 7 que correspondem a receptores que se encontram, respectivamente, antes das estruturas condutoras, no início das estruturas, no fim das estruturas e após as estruturas condutoras.

Neste caso, do ponto de vista de valores de resistividade aparente, verifica-se que apenas no site 4 (fim da estrutura condutora) os valores estão dentro de um intervalo maior, variando entre $10^{2.2} \Omega.m$ e $10^{-1.2} \Omega.m$, sendo que este último valor corresponde ao valor de resistividade efectiva dos corpos condutores do modelo. Esta é a característica que melhor indica a presença da estrutura de condutores no meio homogéneo. No entanto, ao contrário do que aconteceu nos modelos analisados no capítulo 5.1, o receptor que melhor caracteriza a estrutura de condutores/resistivos é o receptor que está no fim da estrutura e não o que está no início, isto em termos de valores.

Em termos de comportamento das curvas, verifica-se que os sites 1 e 7 têm um comportamento distinto dos sites 3 e 4. Em especial relativamente ao tempo em que a resistividade começa a decrescer. Enquanto que nos sites 1 e 7 a resistividade aparente começa a decrescer para o tempo 4 e 5, respectivamente, para os sites 3 e 4, a resistividade aparente começa a decrescer para o tempo 3.

Há uma diferença distinta entre os modelos representados na figura 16. O comportamento das curvas correspondentes aos modelos com condutores/resistivos (verde – figura 15) e bloco único com resistividade longitudinal (z, vermelho – figura 15), têm um comportamento muito próximo e completamente distinto dos modelos cuja resistividade efectiva é o valor médio (azul – figura 15) e valor transversal (x, preto – figura 15). Esta diferença permite inferir que o método identifica uma direcção preferencial de condução de corrente e que essa característica influencia a resposta recebida nos receptores em termos de campo magnético secundário. Em anexo, apresenta-se a figura B2, com resultados equivalentes aos apresentados na figura 16 mas para uma geometria *offset*.

Na tabela 7, pode observar-se a correlação existente entre o modelo com vários condutores/resistivos e os restantes 3 modelos e onde se verifica que há a equivalência que se observa na figura 15.

Tabela 7 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos apresentados na figura 14, para a geometria *central loop*.

MÉDIAS SITE A SITE			
SITE	$\rho_a / \rho_a(\text{médio}) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(x) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(z) (\%)$
1	4199.74	6853.56	5.49
2	32917.55	64219.00	6.80
3	6199.51	6586.82	-9.16
4	16166.08	221769.42	-7.04
5	5717.21	19601.62	-20.90
6	1409.94	2645.35	-10.69
7	382.81	656.65	-4.33

Tabela 8 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos apresentados na figura 14, para a geometria *central loop*.

MÉDIAS A CADA TEMPO			
Tempo (ms)	$\rho_a / \rho_a(\text{médio}) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(x) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(z) (\%)$
0.00700	0.00	0.00	0.00
0.01000	0.01	0.02	-0.01
0.03000	8.46	11.89	-1.45
0.15000	226.03	447.13	-5.79
0.47500	1344.06	2644.40	-7.99

1.62500	5235.18	11616.04	-9.47
5.02500	12533.10	31425.31	-12.34
10.22000	21856.19	67434.42	-13.87
20.00000	44930.59	300848.20	-0.29

Nas tabelas 7 e 8 apresentam-se os valores comparativos entre o modelo com as estruturas condutoras/resistivas e os modelos com um bloco único com um valor de resistividade efectiva média, transversal (directção x) e longitudinal (directção z). Verifica-se que, tanto para cada um dos receptores como para cada um dos tempos considerados, o modelo mais próximo do que tem a estrutura com vários condutores/resistivos é o modelo cujo valor de resistividade efectiva é o longitudinal. Para além disso, e comparando com os modelos analisados no capítulo 5.1, esta proximidade é muito maior que para o caso apresentado nesse capítulo.

Tendo em conta o erro médio encontrado no capítulo 4, verifica-se que a diferença que existe entre o modelo com resistividade efectiva longitudinal e o modelo com vários condutores / resistivos está dentro do erro encontrado no capítulo 4, ao contrário dos modelos com resistividade efectiva média e transversal. O mesmo se verifica para cada um dos tempos considerados (tabela 8). Assim, mais uma vez, é possível considerar que o método identifica corpos anisotrópicos e que é possível identificar a sua orientação e ainda a dimensão horizontal.

Em anexo apresentam-se as tabelas equivalentes às tabelas 7 e 8 (A9 a A10). Os restantes resultados respeitantes aos modelos com corpos de disposição vertical só se encontram disponíveis em versão digital.

5.3 Anisotropia Diagonal

A última disposição de estruturas anisotropicas estudada ao longo deste trabalho, foi a disposição diagonal. Neste capítulo apresenta-se novamente apenas uma das 3 disposições diagonais estudadas ao longo do trabalho. A disposição diagonal apresentada em detalhe neste capítulo é constituída por 5 corpos condutores, espaçados de 10 m que estão progressivamente a maior ou menor profundidade a partir do site 1 para a geometria *central loop* e do *loop* transmissor na geometria *offset*. Na figura 17, apresentam-se as imagens correspondentes a estas disposições e, a tabela 9, apresenta as características gerais de todos os modelos que vão ser analisados neste capítulo.

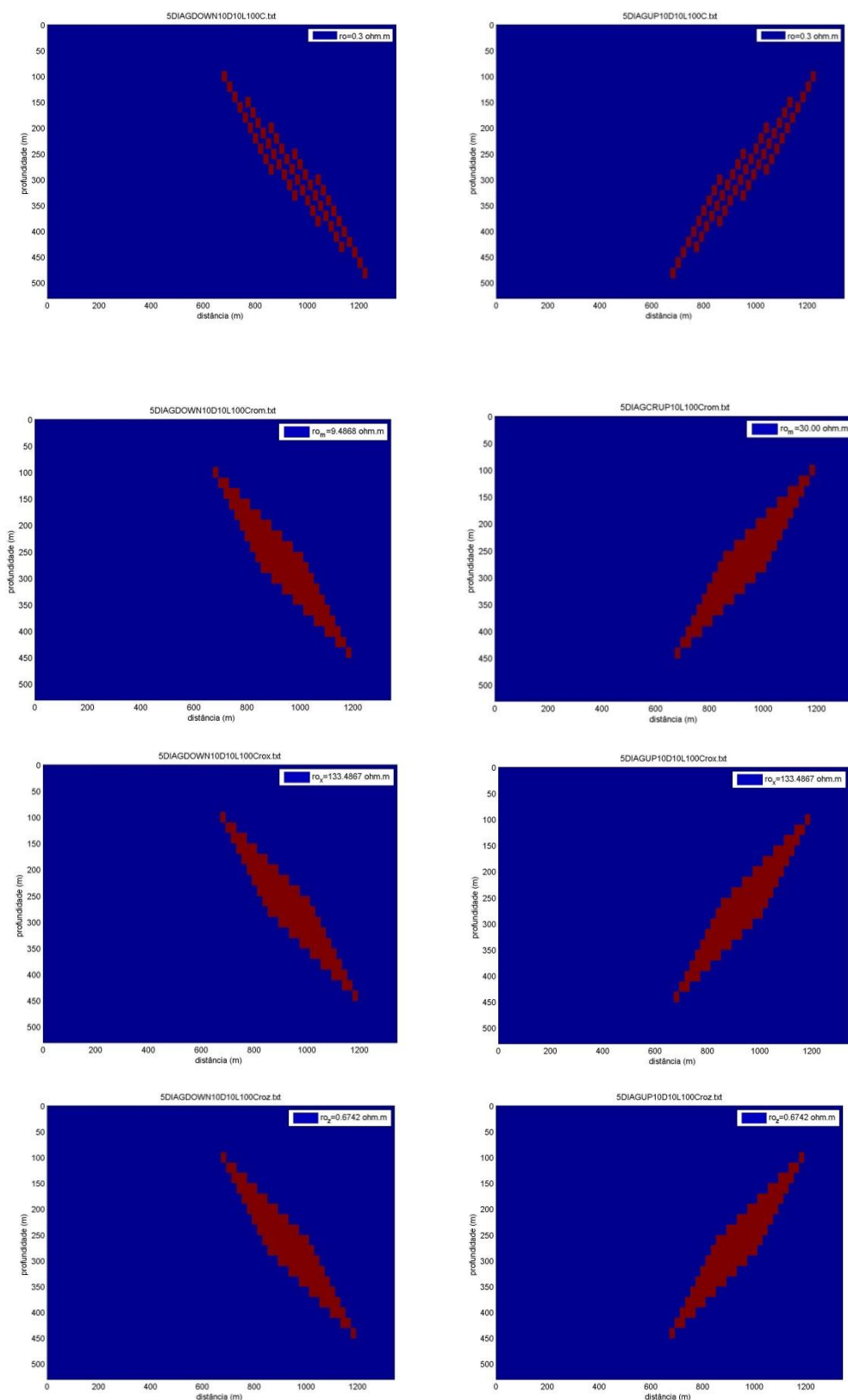


Fig. 16 – Modelos com 5 corpos diagonais descendentes (imagens à esquerda, de cima para baixo – 5DIAGDOWN10D10L100C.txt, 5DIAGDOWN10D10L100Crom.txt, 5DIAGDOWN10D10L100Crox.txt, 5DIAGDOWN10D10L100Croz.txt) e com 5 corpos condutores diagonais ascendentes (imagens à direita e de cima para baixo – 5DIAGUP10D10L100C.txt, 5DIAGUP10D10L100Crom.txt, 5DIAGUP10D10L100Crox.txt, 5DIAGUP10D10L100Croz.txt), em meio homogêneo de 300 $\Omega.m$ e geometria *central loop*

Tabela 9 – Características dos 4 modelos a analisar, para a geometria *central loop*, com corpos dispostos de forma diagonal

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci,ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx/Rx	Posição dos loops (nli, nlf / nlRx)
5DIAGDOWN10D10L100C.txt	5 condutores	100, 118, 10, 40	100, 10	10	300	0,3000	7	(75, 85, 80) (85, 95, 90) (100, 110, 105) (110, 120, 115) (120, 130, 125) (130, 140, 135) (145, 155, 150)
5DIAGDOWN10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		9,4868		
5DIAGDOWN10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		133,4867		
5DIAGDOWN10D10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		0,6742		
5DIAGUP10D10L100C.txt	5 condutores	100, 118, 40, 10	100, 10	10		0.3		
5DIAGUP10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		9,4868		
5DIAGUP10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		133,4867		
5DIAGUP10D10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		0,6742		

Os resultados apresentados a seguir, correspondem aos modelos apresentados na figura 16 e na tabela 9 e, tal como nos capítulos 5.1 e 5.2, faz-se uma comparação entre os dois primeiros modelos apresentados na figura 16 (modelos com vários condutores espaçados de 10 m) e os modelos que se apresentam abaixo (modelos com corpos únicos de resistividade efectiva média, transversal e longitudinal).

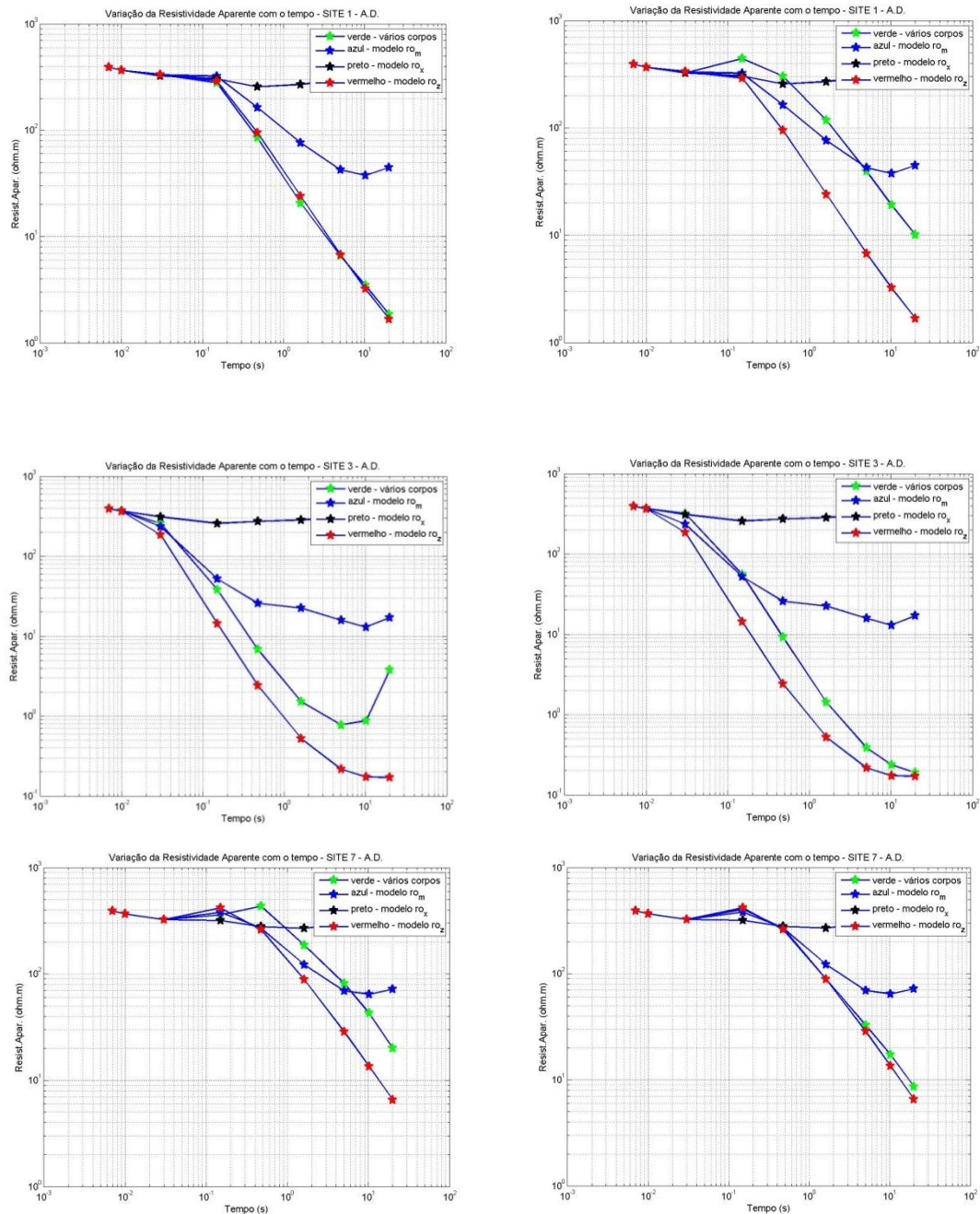


Fig.17 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s) para os sites 1, 3 e 7, dos modelos com disposição diagonal e com variação da profundidade dos corpos condutores apresentados na figura 16. Esquerda, de cima para baixo – Site 1, 3 e 7 para modelos com condutores progressivamente mais profundos; Direita, de cima para baixo – Site 1, 3 e 7 para modelos com condutores progressivamente mais superficiais

Na figura 17, pode observar-se o comportamento da resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s) para os modelos apresentados na figura 16, nos sites 1, 3 e 7. As imagens do lado esquerdo da figura 17, correspondem aos sites 1, 3 e 7 (cima para baixo) dos modelos com corpos condutores diagonais que estão progressivamente mais profundos e as imagens do lado direito, os mesmos sites mas para os modelos cujos corpos diagonais estão progressivamente mais superficiais. Tal como nos modelos analisados anteriormente, também neste caso os sites analisados correspondem aos receptores que estão antes das estruturas condutoras (site 1), no início das estruturas condutoras (Site 3) e após as estruturas condutoras (site 7).

Tal como nos capítulos anteriores, o comportamento das curvas para o site 3 é distinto dos outros dois sites, tanto no intervalo de valores de resistividade aparente em que varia, como no tempo em que os valores de resistividade aparente começam a decair.

Nos sites 1 e 7, estejam os condutores a progredir ou a regredir em profundidade, a resistividade aparente começa a decrescer entre os tempos 4 e 5. Já para o site 3, o tempo para o qual a resistividade aparente começa a decrescer é o tempo 3. Esta diferença permite verificar que a distância dos receptores às estruturas condutoras é importante na resposta que se obtém nos receptores. Ou seja, apesar de todos os receptores acusarem a existência de estruturas condutoras no meio e de haver um decaimento de resistividade aparente ao longo do tempo em todos, a distância de cada receptor às estruturas condutoras influencia a resposta que estes obtêm pois o tempo de propagação do campo magnético secundário é distinto para cada um deles.

Em termos de valores de resistividade aparente, no site 3, os valores decaem até um valor de $10^{-0.9} \Omega.m$ (0.1259) enquanto que para os outros dois sites, os valores nunca estão abaixo de $10^{0.1}$ (1.2589) $\Omega.m$, o que representa quase uma ordem de grandeza de diferença. Assim, verifica-se que o método transiente identifica a posição horizontal das estruturas condutoras e inclusivamente a sua dimensão horizontal. Isto porque os receptores que se encontram em cima das estruturas condutoras (3, 4 e 5) têm valores mínimos de resistividade aparente enquanto que os restantes receptores nunca atingem esses mesmo valores.

A forma da curva para o site 3 é também distinta da forma das curvas nos sites 1 e 7. Enquanto que no site 3, se observa um decaimento mais exponencial, nos sites 1 e 7, esse decaimento é mais linear. Esta diferença nos comportamentos das curvas é mais um factor indicativo da forma como as estruturas condutoras influenciam a resposta que se obtém nos receptores. No caso do site 3, visto estar a uma menor distância dos corpos condutores, a intensidade do campo magnético secundário que atinge o receptor é superior à intensidade que atinge os sites 1 e 7 provocando uma diferença no comportamento das curvas de resistividade aparente que se obtém nos diferentes receptores.

Fazendo a comparação entre o modelo com vários corpos condutores e os modelos com uma única estrutura condutora, verifica-se que há uma maior proximidade entre os modelos com várias estruturas condutoras e o modelo cujo corpo único tem uma resistividade efectiva longitudinal (z). Esta proximidade verifica-se tanto para o modelo cujos corpos condutores são descendentes como para o modelo cujos corpos são ascendentes. No entanto, esta proximidade, do ponto de vista quantitativo (tabela 10) não é tão evidente como a que foi verificada para os modelos com corpos horizontais e verticais.

É ainda importante referir que, pela observação das imagens da figura 17, que as curvas de resistividade aparente para os modelos cujos corpos condutores são descendentes aparentam ter mais influência de erros numéricos no cálculo dos seus valores tendo em conta o comportamento das curvas.

Em anexo, apresenta-se a figura B3, cujos resultados são equivalentes aos apresentados na figura 18, mas para uma geometria *offset*.

Tabela 10 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos à direita na figura 16, para a geometria *central loop*.

MÉDIAS SITE A SITE			
SITE	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
1	38.31	682.31	-47.55
2	-2.22	2315.61	-62.93
3	2213.52	66216.57	-37.02
4	164.72	4096.63	-57.68
5	926.38	46340.88	-8.35
6	720.91	10312.15	9.92

7	128.13	785.63	-6.43
---	--------	--------	-------

Tabela 11 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos à esquerda na figura 16, para a geometria *central loop*.

MÉDIAS SITE A SITE			
SITE	$\rho_a / \rho_a(\text{médio}) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(x) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(z) (\%)$
1	469.10	4017.92	2.05
2	1197.77	46743.69	8.40
3	597.59	13519.42	-51.93
4	993.70	32595.15	-42.91
5	0.86	3221.30	-65.31
6	12.73	913.56	-55.47
7	25.45	301.20	-30.68

Nas tabelas 10 e 11, apresenta-se a comparação quantitativa feita entre o modelo com vários condutores ascendentes e descendentes, respectivamente, e os modelos com resistividades efectivas médias, transversais e longitudinais.

Tal como já referido atrás, a comparação entre os modelos com vários condutores e o modelo com resistividade longitudinal (z) é mais forte. No entanto, para a maioria dos sites, o valor está fora do valor de erro calculado no capítulo 4.

Comparando os valores da coluna mais à direita (comparação entre modelos com vários condutores e modelo com resistividade efectiva longitudinal) de ambas as tabelas, verifica-se que quando se tem uma disposição dos corpos ascendente, o valor é menor para os últimos sites e, quando se tem uma disposição dos corpos descendente, o valor é menor para os primeiros sites. Assim, verifica-se a existência de uma simetria entre as duas disposições.

Tabela 12 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos à direita na figura 16, para a geometria *central loop*.

MÉDIAS A CADA TEMPO			
Tempo (ms)	$\rho_a / \rho_a(\text{médio}) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(x) (\%)$	$\rho_a / \rho_a(z) (\%)$
0.00700	0.00	0.00	0.00
0.01000	-0.03	0.01	-0.05
0.03000	-2.83	5.78	-10.18
0.15000	19.98	204.85	-36.19
0.47500	133.88	1408.57	-41.77
1.62500	533.23	8106.24	-41.55
5.02500	1063.35	26472.98	-45.09
10.22000	1375.91	46090.88	-47.76
20.00000	2263.32	85817.55	-47.46

Tabela 13 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos à esquerda na figura 16, para a geometria *central loop*.

MÉDIAS A CADA TEMPO			
Tempo (ms)	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
0.00700	0.00	0.00	0.00
0.01000	-0.03	0.01	-0.05
0.03000	-5.12	3.05	-12.04
0.15000	14.47	178.65	-37.01
0.47500	123.26	1277.08	-46.54
1.62500	522.28	7353.24	-46.90
5.02500	948.68	23151.16	-50.65
10.22000	1097.83	37459.34	-53.99
20.00000	1537.88	60836.05	-56.05

Nas tabelas 12 e 13 faz-se o mesmo tipo de comparação que nas tabelas 10 e 11 mas, neste caso, para cada tempo. Tal como anteriormente, existe uma correlação mais forte entre os modelos com vários condutores e os modelos com uma resistividade efectiva longitudinal. No entanto, à excepção dos 3 primeiros tempos, o valor de correlação não está dentro do erro calculado no capítulo 4. A forma como os corpos estão dispostos no meio poderá ser a explicação para este fenómeno.

Em anexo, apresentam-se as tabelas A11 a A14, com os resultados equivalentes aos apresentados da tabela 8 a 11 mas para uma geometria *offset*.

6. Caso Prático – Moura

A aplicabilidade do método numérico estudado ao longo deste trabalho fica reforçada se, quando aplicado a dados reais, se obtiverem resultados coerentes com a estrutura geológica do local onde foram recolhidos os dados. Neste capítulo, pretende-se fazer uma correspondência entre as curvas de dados reais recolhidas na zona da falha de Vidigueira-Moura (FVM) (Monteiro Santos *et al.*, 2009).

6.1 Enquadramento Geológico

A falha de Vidigueira-Moura (FVM) localiza-se na área SW do maciço Hercíniano Ibérico, perto da fronteira sul da zona geotectónica de Ossa Morena.

Esta zona é geologicamente caracterizada por meta-sedimentos e rochas meta-vulcânicas com idades que variam entre o Proterozóico superior e o Silúrico. Do ponto de vista regional, a estrutura tectónica da zona de Ossa Morena é caracterizada por um anti-forma com uma orientação NW-SE a NNW-SSE (anti-forma de Moura-Ficalho), onde os meta-sedimentos e as rochas meta-vulcânicas estão fortemente dobradas com uma orientação NNW-SSE (Monteiro Santos *et al.*, 2009).

A FVM tem um comprimento de 65 km, uma tendência E-W e afundamento para N da falha Variscana. Esta última teve uma reactivação durante o Cenozóico com deslizamento lateral direito inverso e é a fronteira norte da bacia sedimentar Cenozóica de Vidigueira-Moura.

A actividade Cenozóica da FVM é indiciada pela presença de contactos falhados entre as rochas do basamento (fundamentalmente xistos, rochas meta-vulcânicas e granitóides) e os sedimentos do Cenozóico da bacia de Vidigueira-Moura (Brum da Silveira *et al.*, 2009). Na figura 20, apresenta-se o mapa geológico simplificado da zona geológica onde foram recolhidos os dados.

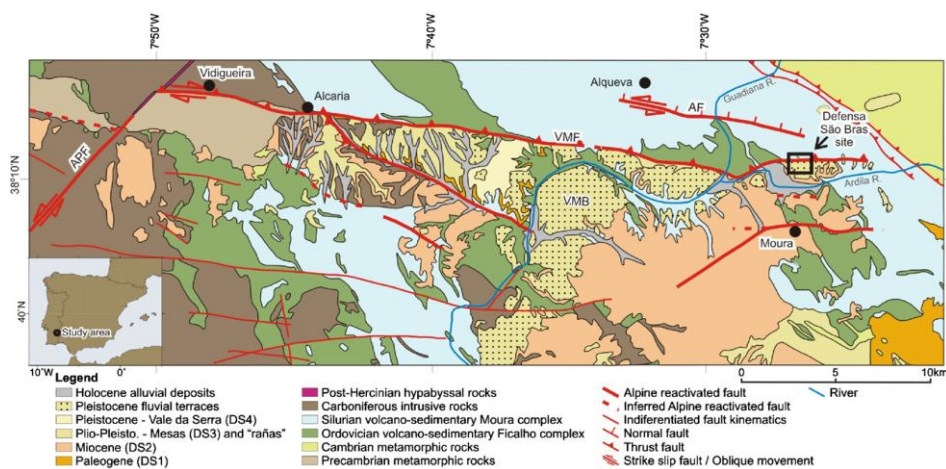


Fig. 18 – Mapa geológico simplificado da bacia Cenozóica de Vidigueira-Moura, indicando o local de Defesa de São Brás (local de recolha de dados). AF – falha do Alqueva; APF – falha do Alentejo-Plasencia; VMB – bacia de Vidigueira-Moura; VMF – falha de Vidigueira Moura (Monteiro Santos *et al.*, 2009)

Como se pode observar pela figura 18, o local onde os dados foram recolhidos foi Defesa de São Brás, que se localiza na ponta W da falha Vidigueira-Moura. Neste local, é possível caracterizar uma escarpa de uma falha Cenozóica, com uma extensão de 100 m, e que se relaciona com a FVM. Esta relação coloca em contacto basamento contra basamento. Na parede da falha principal, encontra-se a presença de uma pequena escarpa geomorfológica, com cerca de 20 a 50 cm de altura, paralela à escarpa principal, de origem desconhecida. Por último, cerca de 130 m da escarpa da falha principal encontram-se dentro de um lago artificial e tem sido descrita como constituída pela presença de rochas meta-vulcânicas por cima de depósitos sedimentares do Quaternário.

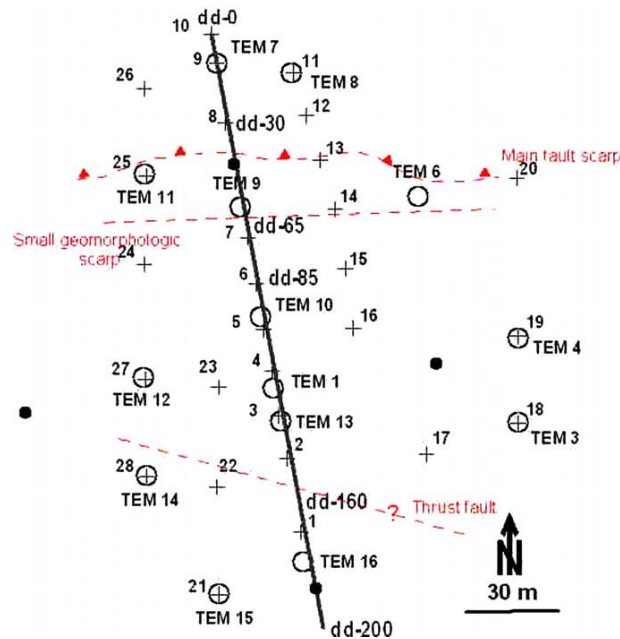


Fig. 19 – Localização das estruturas geológicas mais importantes e das sondagens geológicas feitas em Defesa de São Brás. (4+) – tensor de resistividade eléctrica; (o TEM1) – sondagens TEM; (linha) – perfil dipolo-dipolo. (Monteiro Santos *et al.*, 2009)

Na figura 19, apresenta-se a localização das sondagens que foram realizadas nos estudos em Moura. No caso deste trabalho, as sondagens comparadas foram as que se encontram em cima do perfil de resistividade dipolo-dipolo, ou seja, as sondagens TEM 7, TEM 9, TEM 10, TEM 1, TEM 13 e TEM 16.

6.2 Características das sondagens TEM

O total de sondagens feitas com o método electromagnético transiente foram 16, tal como se pode observar na figura 19. Os dados foram adquiridos com o equipamento TEMFAST HP48 com uma configuração de *loop* coincidente (transmissor e receptor são o mesmo fio). Este equipamento recolhe dados a uma dimensão. Assim sendo, os dados recolhidos são a variação da resistividade aparente em profundidade.

Os *loops* tinham 25 m de comprimento e a janela de tempo de aquisição varia entre os 5 μ s e os 500 μ s. Os dados foram recolhidos com um valor de *stack* de 15, ou seja, a mesma medida é feita 15 vezes e, o valor recolhido é a média desse conjunto de valores. A corrente média injectada é de 2.3 A.

Na sua maioria, as sondagens apresentam níveis de ruído elevados para os tempos longos devido a estruturas artificiais construídas pelo homem (Monteiro Santos *et al.*, 2009). Esses valores foram eliminados dos dados das sondagens e não foram tidos em conta para a análise dos dados.

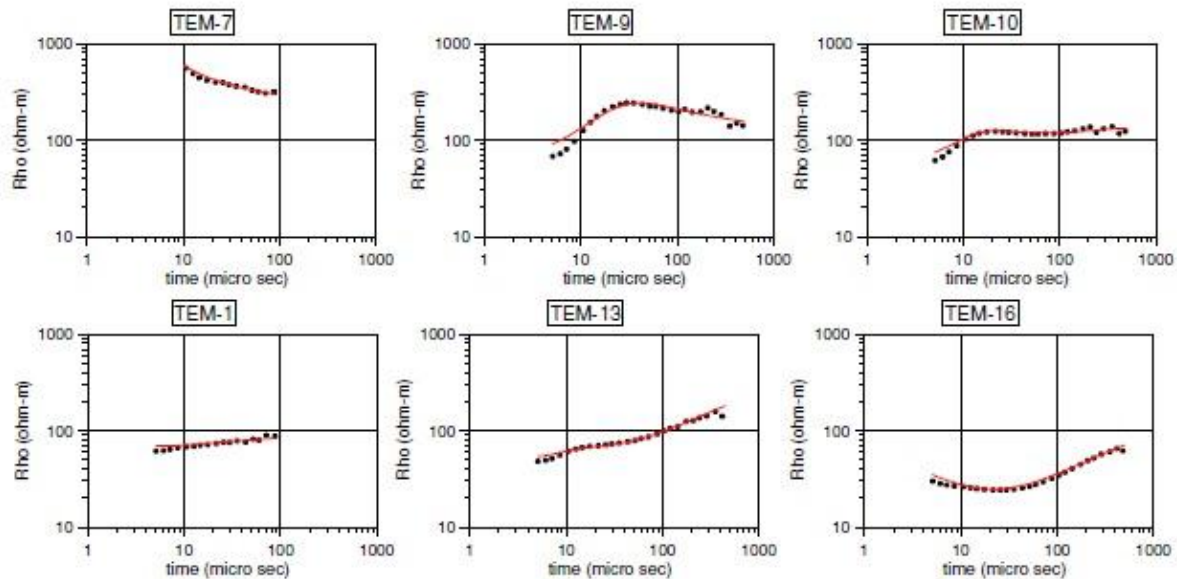


Fig. 20 – Variação da resistividade ($\Omega.m$) com o tempo (μs) para as sondagens de interesse neste trabalho. (Monteiro Santos et al., 2009)

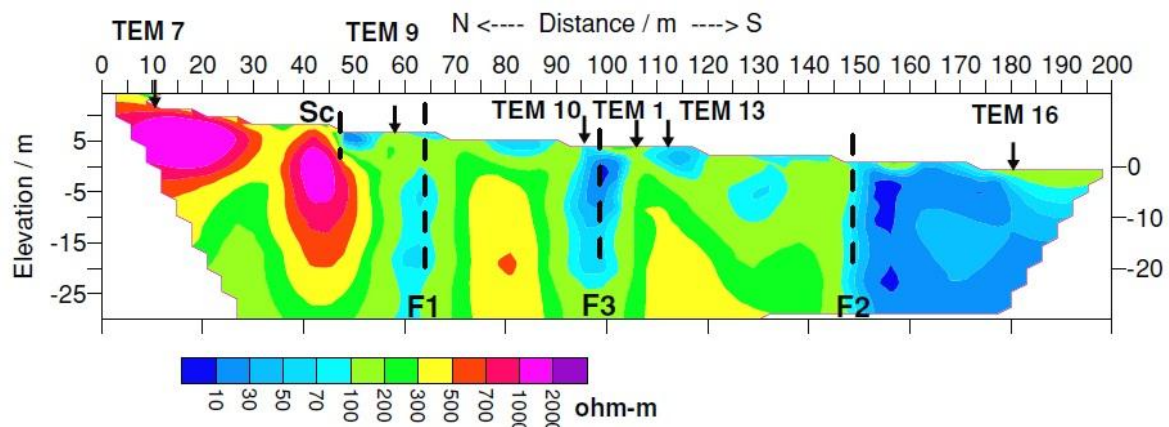


Fig. 21 – Modelo de resistividade calculado a partir da inversão dos dados de dipolo-dipolo. (Monteiro Santos et al., 2009)

As sondagens de interesse para este trabalho apresentam-se na figura 20. Como se pode observar pelo modelo de resistividade apresentado na figura 21, as sondagens TEM distribuem-se ao longo de uma distância de 200 m em x no sentido N-S. O modelo de resistividade apresenta uma profundidade máxima de 30 m. No entanto, as sondagens TEM pelo intervalo de tempos utilizado na recolha de dados, atingem profundidades da ordem dos 100 m. Do modelo de resistividade, podem retirar-se algumas características importantes para a realização de um modelo comparativo que permita associar as curvas reais às curvas a partir do modelo. Na figura 21, verifica-se que a secção de solo tem 5 corpos que se destacam, 2 resistivos (com valores da ordem dos 2000 $\Omega.m$) e 3 condutores (com valores da ordem dos 15 a 50 $\Omega.m$) com dimensões diversas. A resistividade média do meio estará entre os 100 e os 300 $\Omega.m$.

Os 3 condutores que se observam corresponderam a 3 falhas pelo que será lógico que estas se prolonguem para maior profundidade. À direita do modelo (zona Sul) apresenta-se uma zona condutora que corresponderá à bacia de Vidigueira Moura. Os dois corpos condutores à esquerda, no modelo de resistividade (zona Norte), corresponderam a formações xistosas (Monteiro Santos et al., 2009).

6.3 Resultados obtidos

Após o teste de diversos modelos sintéticos encontraram-se dois, em que o ajuste entre as curvas de dados reais e de dados sintéticos foi o mais próximo conseguido.

Tendo em conta as características apresentadas no capítulo 6.2, os dois modelos que se apresentam neste trabalho, têm como resistividades do meio 200 $\Omega.m$ (mod12.txt) e 180 $\Omega.m$ (mod14.txt), sendo que as estruturas colocadas em ambos os modelos são as mesmas e têm as mesmas dimensões. Foi utilizado um intervalo de tempos mais alargado tendo em conta o intervalo de tempo de recolha de dados. Esse intervalo está entre os 0.002 s e os 0.105 s. Para este intervalo de tempo, foram feitas medições em 20 tempos que se encontram dentro do mesmo.

Visto que o método numérico não permite a utilização de uma geometria de *loop* coincidente, optou-se por utilizar a geometria de *central loop* onde o transmissor tem um *loop* com 25 m de lado, tal como o utilizado na recolha de dados reais. O receptor, fica ao centro do *loop* posto que estão localizados de acordo com o modelo de resistividade apresentado na figura 22.

Para fazer a comparação adequada das curvas reais com as curvas sintéticas, os valores anómalos que foram encontrados nos dados reais e os valores recolhidos acima dos 0.105 s foram todos removidos dos ficheiros de dados para as sondagens de interesse neste trabalho.

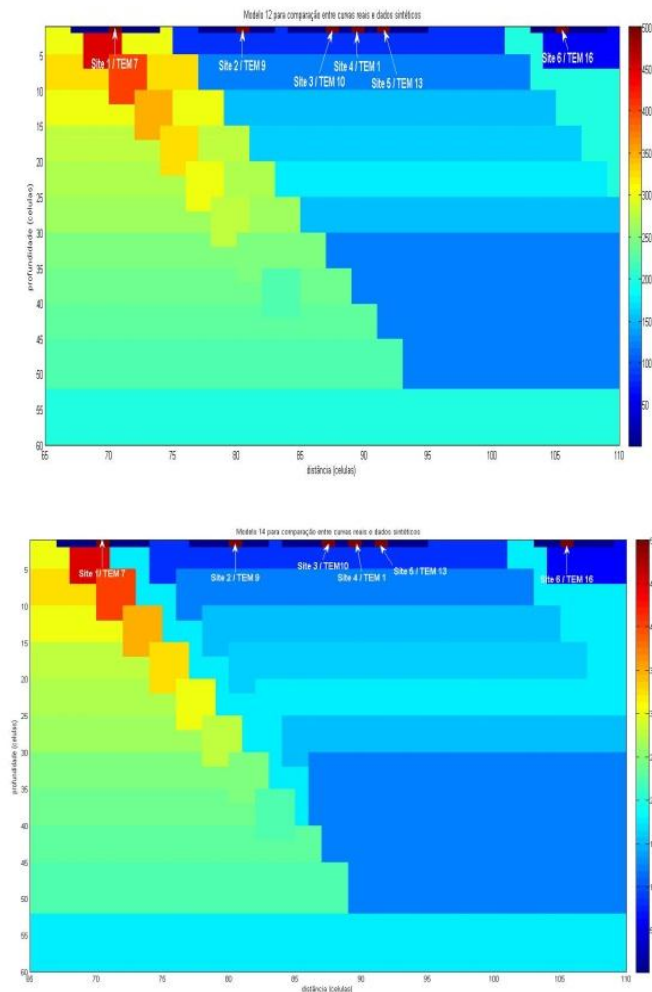


Fig. 22 – Secções de solo obtidas com os modelos gerados. Mod12.txt – em cima; mod14.txt – em baixo

Como se pode observar na figura 22, os modelos obtidos são muito semelhantes. Ambos são constituídos por 4 estruturas colocadas num meio homogéneo. A estrutura mais à esquerda é constituída por um conjunto de blocos progressivamente mais extensos em x e cuja resistividade é progressivamente menor em profundidade. Seguidamente, observa-se uma estrutura mais fina (10 m de espessura) com os valores de resistividade mais elevados de todo o modelo. A estrutura mais central do modelo é constituída por um conjunto de blocos de resistividade aparente, progressivamente crescente (em profundidade), sendo que, no global, esses valores são menores que os valores apresentados para as estruturas à sua esquerda. Finalmente, observa-se uma estrutura condutora à direita do modelo, cujas resistividades diminuem até meio da estrutura e voltam a aumentar em profundidade. O ficheiro correspondente a estes modelos encontra-se disponível na versão digital deste trabalho.

Para além da resistividade do meio ser diferente em $20 \Omega.m$, como foi referido atrás, existem mais 3 pequenas diferenças entre os dois modelos. A primeira, o corpo mais resistivo está 10 m mais à esquerda no modelo 12 que no modelo 14. Em segundo lugar, o modelo 12, não apresenta um espaço entre as duas estruturas como é apresentado no modelo 14. Esse espaço tem 20 m de largura e a resistividade é igual à do meio. Finalmente, em terceiro lugar, a camada mais condutora, do lado direito do modelo, é maior para o modelo 14.

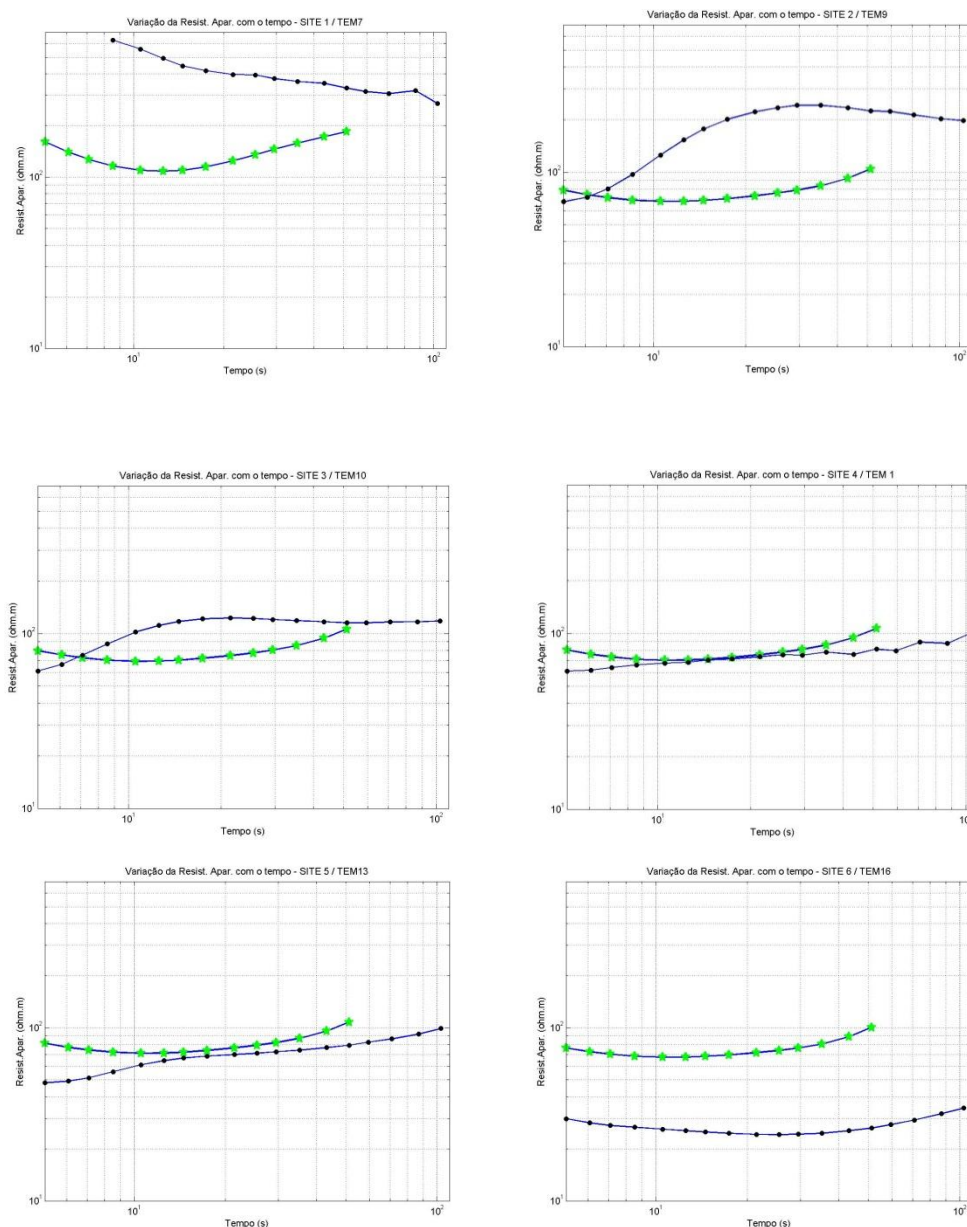


Fig. 23 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (μs) para o modelo 12 ($200 \Omega.m$). Comparação entre a curva dos dados recolhidos e as curvas do modelo criado. Site 1 / TEM 9 – Canto superior esquerdo; Site 6 / TEM 16 – Canto inferior direito; (Preto) – dados reais; (Verde) – dados sintéticos

Tabela 14 – Comparação média entre os valores de resistividade dos dados reais e os valores de resistividade dos dados sintéticos para o modelo 12 com $200 \Omega.m$ de resistividade do meio.

mod12	Médias
Site 1 / Tem 7	-60.19
Site 2 / Tem 9	-49.39
Site 3 / Tem 10	-19.19
Site 4 / Tem 1	8.71
Site 5 / Tem 13	22.07
Site 6 / Tem 16	203.71

Na figura 23 e tabela 14, apresentam-se os resultados obtidos da comparação entre as curvas do modelo sintético mod12.txt e as curvas dos dados reais.

O que se verifica, de um modo geral, é que o ajuste entre as curvas reais e sintéticas de variação da resistividade aparente com o tempo, não é bom, em especial em termos de comportamento das mesmas. Apenas as curvas que correspondem aos sites 4, 5 e 6 (TEM 1, 13 e 16) têm um comportamento semelhante às curvas reais. Nas restantes curvas, o comportamento é quase oposto às curvas reais.

Do ponto de vista dos valores de resistividade aparente reais e sintéticos, as curvas cujo erro é menor são as curvas dos sites 3, 4 e 5 que correspondem às sondagens 10, 1 e 13. O site 4 / TEM 1 é o que tem melhores resultados com um erro de 8.71%. O erro cometido para as outras duas curvas é de -19.19% para o site 3 / TEM 10 e de 22.07% para o site 5 / TEM 13. Para os restantes 3 sites / 3 sondagens as diferenças são de 50% ou superior, chegando, no caso do site 6 / TEM 16, a 203.71% de diferença.

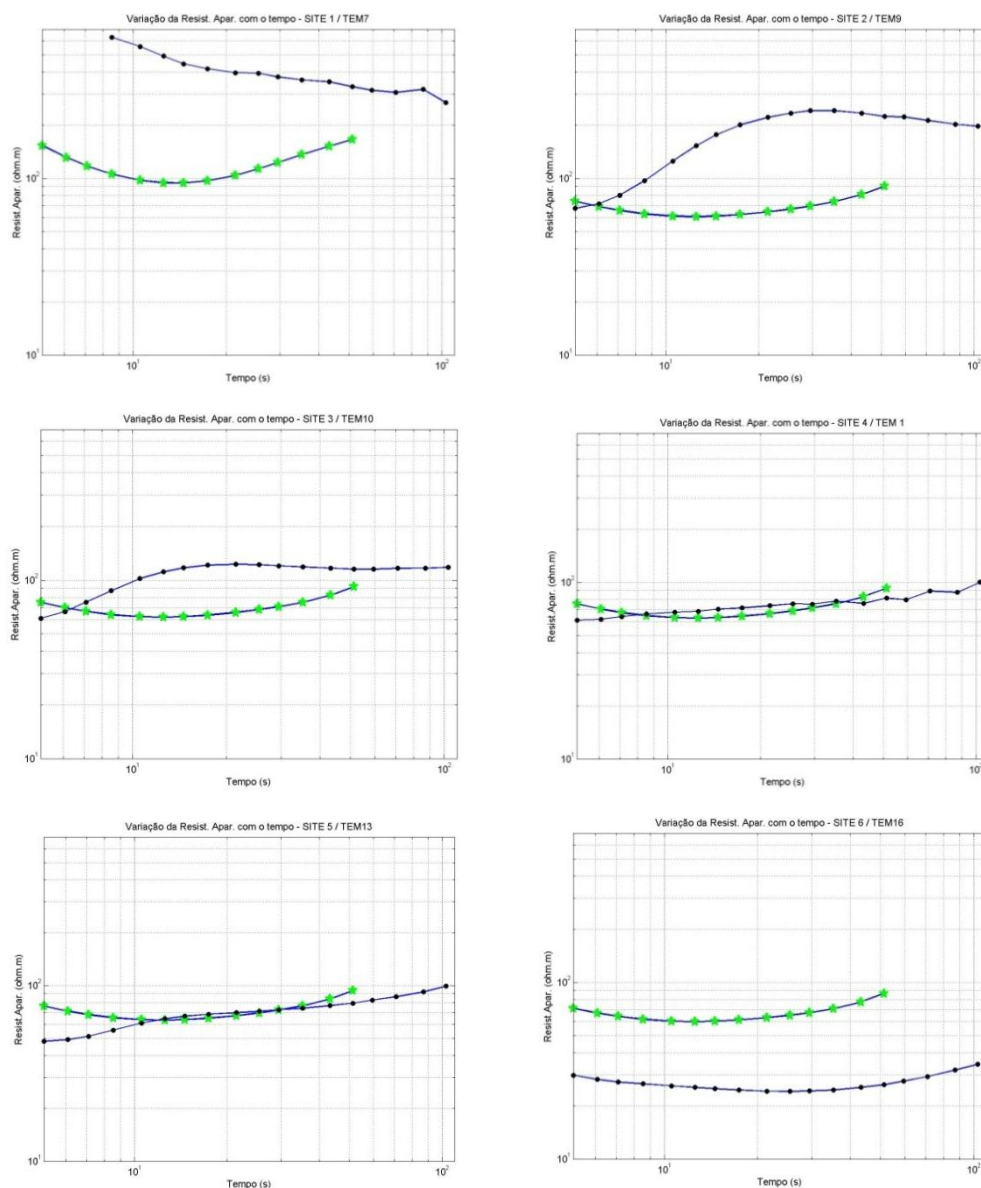


Fig. 24 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (μs) para o modelo 14 ($180 \Omega.m$). Comparação entre a curva dos dados recolhidos e as curvas do modelo criado. Site 1 / TEM 9 – Canto superior esquerdo; Site 6 / TEM 16 – Canto inferior direito; (Preto) – dados reais; (Verde) – dados sintéticos

Tabela 15 – Comparação entre os valores de resistividade dos dados reais e os valores de resistividade dos dados sintéticos para o modelo 14 com 180 Ω .m de resistividade do meio.

mod14	Médias
Site 1 / Tem 7	-64.93
Site 2 / Tem 9	-54.61
Site 3 / Tem 10	-27.68
Site 4 / Tem 1	-3.02
Site 5 / Tem 13	8.70
Site 6 / Tem 16	167.81

A figura 24 e a tabela 15 correspondem aos resultados obtidos para o modelo mod14.txt. Tal como para o modelo anterior, o ajuste entre as curvas das sondagens e as curvas sintéticas geradas pelo modelo, não é bom.

Do ponto de vista do comportamento das curvas, observa-se uma situação semelhante à já apresentada para o modelo anterior, ou seja, as curvas sintéticas que apresentam um comportamento semelhante ao comportamento das curvas reais são as dos sites 4, 5 e 6 que correspondem às sondagens TEM 1, 13 e 16.

Relativamente aos valores obtidos de resistividade aparente, verifica-se que, no caso deste modelo, os sites com menor erro são os 3, 4 e 5 (TEM 10, 1 e 13), tal como no modelo anterior (Tabela 15). No entanto, apesar de para o site 3 ser ligeiramente pior (27.68%) que o anterior, os sites 4 e 5 têm melhores aproximações (-3.02% e 8.7%) que no modelo anterior. Para além disso, para o site 6 / TEM 16, reduz-se a diferença para 167.87% com uma agravamento para o site 1 e 2 (TEM 7 e 9) de 4.74% e 5.22%, respectivamente.

É importante referir que o valor dos fluxos magnéticos para os modelos gerados estava entre as ordens de grandeza de 10^{-9} e 10^{-13} V/m². Estes valores são muito baixos e têm influência no cálculo dos valores de resistividade aparente.

7. Discussão dos resultados

7.1 Dados Sintéticos

Neste capítulo apresenta-se um conjunto de tabelas resumo da comparação feita entre os modelos com vários corpos anisotrópicos e os modelos com corpos únicos, cuja resistividade efectiva é dada pelas equações (5.1), (5.2) e (5.3). As comparações são feitas para cada uma das disposições dos corpos (horizontal, vertical e diagonal) e para cada uma das geometrias utilizadas (*central loop* e *offset*).

Tabela 16 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para cada disposição horizontal, geometria *central loop*.

Nome do ficheiro	____rom.txt (%)	____rox.txt (%)	____roz.txt (%)
17HOR10D300L10C.txt	46324.18	53.90	208303.57
7HORDOWN10D100L10C.txt	2127.10	-12.14	5885.54
7HORUP10D100L10C.txt	1942.20	-19.49	5647.93
10HORCR300L10C.txt	63375.25	16.38	214375.25
HORCRDOWN100L10C.txt	2569.62	-19.63	4099.13
HORCRUP100L10C.txt	3250.37	-19.98	5823.01

Para a geometria *central loop* e modelos com disposição horizontal (tabela 16), verifica-se, em primeiro lugar que, independentemente do modelo analisado, todos os modelos com vários corpos dispostos horizontalmente, têm uma aproximação clara com o modelo de bloco único com área equivalente com o valor de resistividade longitudinal (direcção x). Essa diferença nunca ultrapassa os 54%, enquanto que na comparação com os modelos com resistividade efectiva média e transversal (direcção z) obtiveram-se diferenças superiores a 1000%. Esta disparidade, clara na comparação entre os modelos, mostra, por si só, que o método aplicado é capaz de identificar uma direcção preferencial de condução da corrente e propagação do campo electromagnético que é difundido na secção de solo.

De todos os modelos com corpos dispostos horizontalmente, verifica-se que são os modelos com os corpos progressivamente mais profundos e com corpos condutores resistivos e condutores intercalados, que apresentam menor diferença relativamente ao modelo com valor de resistividade efectiva longitudinal (direcção x). Essas diferenças são de -12.14% e de 16.38%, respectivamente. Relativamente ao primeiro modelo, o primeiro corpo condutor encontra-se a uma profundidade de 150 m e o último condutor a uma profundidade de 270 m. O facto de o campo difundido ter que percorrer uma maior distância para atingir o último condutor, faz com que o campo que atinge esse condutor seja menos intenso e mais suave. Por outro lado, as correntes eléctricas secundárias que se geram nos condutores e o respectivo campo magnético secundário que se forma, têm que percorrer uma maior distância até aos receptores. Assim, se se excluir o receptor (3º) que se encontra muito próximo do primeiro corpo condutor, a resposta obtida pelos restantes receptores é uma resposta suave, permitindo que os erros numéricos sejam minimizados e que os valores de resistividade aparente, calculados pelo método numérico, sejam mais coerentes.

Os restantes modelos com disposições horizontais descendentes e ascendentes, apresentam uma diferença para o modelo de resistividade efectiva longitudinal de, aproximadamente, 20%. Relativamente aos dois modelos com disposição horizontal com os corpos ascendentes, também a distância é um factor que contribui para a estabilidade do cálculo dos valores de resistividade aparente por parte do método numérico aplicado. Isto porque, à medida que o campo electromagnético é difundido, a distância para os corpos condutores decresce. Isto implica que o campo electromagnético que atinge esses condutores é mais forte, provocando correntes eléctricas secundárias mais intensas e um campo magnético secundário mais intenso e com maior variabilidade. Assim, a resposta que se obtém nos receptores, apesar de mais forte, tem variações mais bruscas, o que potencia os erros numéricos no cálculo dos valores de resistividade aparente. No caso do modelo com corpos

descendentes, em que se intercalaram resistivos e condutores, a existência dos corpos resistivos deverá ser o factor preponderante para que haja uma diferença tão significativa. Isto, porque, se no caso em que os condutores estão dispostos de forma descendente sem corpos resistivos, a proximidade entre modelos é 8% maior e esta é a única diferença entre esses dois modelos, então é a presença dos corpos resistivos que proporciona estes 8% de maior diferença. O facto de os corpos resistivos terem um valor de $3000\Omega.m$ leva a que o campo electromagnético que é induzido na secção, quando os atinge, seja fundamentalmente absorvido por estes. Ora, dado que o modelo com um bloco único de resistividade longitudinal tem uma resistividade homogénea ao longo do bloco, a diferença de difusão do campo e respectiva resposta deverá ser evidente entre os dois modelos.

O modelo cuja comparação apresenta uma maior diferença, é o modelo mais simples, em que os corpos condutores estão dispostos horizontalmente alinhados uns por baixo dos outros, com um espaçamento de 10 m entre cada um dos corpos. Essa diferença é de 53.9% para o modelo com um bloco único de resistividade longitudinal. A diferença nos valores de resistividade efectiva dos dois modelos é de $0.3\Omega.m$ para os vários condutores e de $0.6182\Omega.m$ para o bloco único. Esta diferença leva a que o modelo com o bloco único absorva mais o campo electromagnético difundido que o modelo com vários corpos. No entanto, a sua área, apesar de equivalente à ocupada pelos vários corpos, é totalmente ocupada por um único corpo, pelo que deveria gerar correntes secundárias e campo magnético secundário mais intenso. Assim, e tendo em conta que os corpos condutores têm 300 m de comprimento, o campo induzido na secção ficará fundamentalmente no corpo condutor mais superficial, não atingindo os seguintes, devido a ter um meio mais resistivo entre eles, enquanto que no bloco único, o campo atingirá todo o corpo. Esta deverá ser a explicação fundamental para uma diferença tão clara entre os dois modelos.

Tabela 17 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição vertical, para a geometria *central loop*.

Nome do ficheiro	_____rom.txt (%)	_____rox.txt (%)	_____roz.txt (%)
20VERT10D10L300C.txt	1037.85	274571.73	51.66
7VERTDOWN10D10L100C.txt	1161.18	11160.91	-32.14
7VERTUP10D10L100C.txt	2137.17	11738.43	-26.05
10VERTCR10L300C.txt	9570.40	46047.49	-5.69
VERTCRDOWN10L100C.txt	1378.24	12542.86	-35.26
VERTCRUP10L100C.txt	-1674.83	13161.28	-30.66

A comparação entre os modelos com várias disposições verticais, para uma geometria de *central loop*, com os modelos de bloco único com resistividades efectivas média, transversal (x, neste caso) e longitudinal (z, neste caso) é apresentada na tabela 17. Tal como para os modelos com disposição horizontal, a proximidade entre os modelos, com os vários condutores e os modelos com resistividade longitudinal (z), é clara, quando comparado com os modelos de resistividade efectiva média (mais de 1000%) e resistividade efectiva transversal (mais de 11000%). Mais uma vez, o método aplicado identifica uma direcção preferencial de propagação do campo electromagnético e de geração de correntes eléctricas e campo magnético secundário.

Neste caso, o modelo com vários condutores que melhor coincide com o modelo com resistividade efectiva longitudinal, é o modelo com corpos condutores e resistivos intercalados, dispostos todos à mesma profundidade. A diferença entre este modelo e o modelo com resistividade efectiva longitudinal é de -5.69%. Neste caso, o contraste existente entre os corpos condutores/resistivos, o bloco único e o meio envolvente é elevado, factor que contribui de forma clara para a aproximação dos dois modelos. Neste caso, temos uma diferença por defeito, ou seja, os valores de resistividade aparente obtidos para o modelo com um bloco único são superiores aos obtidos para o modelo com vários corpos condutores/resistivos. Isto está de acordo com os valores de resistividade efectiva longitudinal do bloco único e com os valores de resistividade efectiva dos condutores do modelo que

tem os corpos intercalados. Ora, a diferença entre o valor de resistividade efectiva dos condutores intercalados e do bloco único é de 0.3 para 0.6 Ω .m. Assim, poderá inferir-se que a diferença entre os modelos será devido, fundamentalmente, à diferença entre estes dois valores de resistividade efectiva. No entanto, os corpos resistivos têm um papel fundamental visto que para o modelo equivalente, mas que contém apenas os corpos condutores espaçados de 10 m, num meio de 300 Ω .m, a diferença entre os dois modelos é de 51.66%.

Os modelos com os corpos condutores descendentes e ascendentes, com ou sem corpos resistivos intercalados, têm um intervalo de diferença do modelo com resistividade efectiva longitudinal que varia entre -26.05% (modelo com condutores ascendentes) e -35.26% (modelo com condutores e resistivos descendentes). Estas diferenças são um pouco superiores às verificadas para os modelos de disposição horizontal com a mesma perspectiva e, não se enquadram dentro do erro cometido pelo método numérico. Poderá deduzir-se, que o método numérico é mais indicado para identificação de anisotropias horizontais, pelo menos com esta geometria.

Tabela 18 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição diagonal, para a geometria *central loop*.

Nome do ficheiro	____rom.txt (%)	____rox.txt (%)	____roz.txt (%)
5DIAG10D10L100C.txt	3177.24	55953.41	2.58
5DIAGDOWN10D10L100C.txt	471.03	14473.17	-33.69
5DIAGUP10D10L100C.txt	598.53	18678.54	-30.01
CRDIAG10L100C.txt	10782.79	81753.90	-13.40
CRDIAGDOWN10L100C.txt	3338.97	13753.77	-38.15
CRDIAGUP10L100C.txt	-8538.71	34165.19	-29.23

Para os modelos com disposição diagonal e com geometria em *central loop* (tabela 18), verifica-se que o modelo de bloco único que mais se aproxima dos modelos com vários corpos diagonais, é o modelo com resistividade efectiva longitudinal (directção z). Tendo em conta que os corpos se estendem claramente mais em profundidade que em largura, o método volta a oferecer uma indicação correcta de uma directção preferencial de propagação do campo.

O modelo com 5 corpos diagonais, espaçados de 10 m, é o modelo cujos valores comparativos com o modelo de resistividade efectiva longitudinal são melhores, sendo a diferença de apenas 2.58%. Ao contrário do que acontece com as disposições verticais e horizontais, no caso da disposição diagonal é o modelo mais simples que tem melhor aproximação com o modelo de bloco único apesar de a diferença entre resistividade efectiva dos condutores e do bloco único ser equivalente à registada para as disposições horizontal e vertical. Assim sendo, neste caso, a posição dos condutores, será a explicação fundamental para que seja este o modelo com melhor aproximação. Isto porque a directção preferencial de propagação não é x ou z mas sim uma directção diagonal.

As diferenças que se registam para os outros modelos, são equivalentes às já referidas para a disposição vertical e horizontal, razão pela qual ocorrem, serão equivalentes e já referidas acima para as outras disposições.

Tabela 19 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição horizontal, para a geometria *offset*.

Nome do ficheiro	____rom.txt (%)	____rox.txt (%)	____roz.txt (%)
15RX17HOR10D300L10C.txt	-733.07	33.24	-9591.25
15RX7HORDOWN10D100L10C.txt	-2686.17	27.00	-909.88
15RX7HORUP10D100L10C.txt	-79.81	-34.48	-159.58

15RX10HORCR300L10C.txt	-12962.40	13.18	-8480.30
15RXHORCRDOWN100L10C.txt	-836.81	21.77	-784.11
15RXHORCRUP100L10C.txt	-218.34	-31.41	-182.97

Tabela 20 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição vertical, para a geometria *offset*.

Nome do ficheiro	____rom.txt (%)	____rox.txt (%)	____roz.txt (%)
15RX20VERT10D10L300C.txt	-2228.17	-9489.08	26.19
15RX7VERTDOWN10D10L100C.txt	704.05	-3331.65	-11.56
15RX7VERTUP10D10L100C.txt	64.46	-648.19	-48.77
15RX10VERTCR10L300C.txt	-7669.38	-5821.14	5.63
15RXVERTCRDOWN10L100C.txt	-5936.29	-910.93	-0.92
15RXVERTCRUP10L100C.txt	-1026.11	-173.74	-48.74

Tabela 21 – Comparação, em percentagem, entre os 4 modelos, para a disposição diagonal, para a geometria *offset*.

Nome do ficheiro	____rom.txt (%)	____rox.txt (%)	____roz.txt (%)
15RX5DIAG10D10L100C.txt	5489.35	-8355.01	29.78
15RX5DIAGDOWN10D10L100C.txt	717.79	-5174.54	5.82
15RX5DIAGUP10D10L100C.txt	21.03	-609.08	-49.76
15RXCRDIAG10L100C.txt	-6771.97	-7118.59	8.53
15RXCRDIAGDOWN10L100C.txt	-8858.67	-3413.97	1.52
15RXCRDIAGUP10L100C.txt	-2067.33	-775.89	-49.46

As tabelas 19 a 21 apresentam os resultados da comparação quantitativa entre os modelos com várias estruturas condutoras e os modelos com resistividades efectivas média, longitudinal e transversal, para cada uma das disposições mas para uma geometria em *offset*.

Tal como para a geometria *central loop*, os modelos com disposição horizontal aproximam-se claramente do modelo de bloco único, com valor de resistividade efectiva da direcção x, os modelos com disposição vertical e diagonal, com o modelo de resistividade efectiva da direcção z. Mais uma vez, demonstra-se que o método aplicado indica de forma clara uma direcção preferencial de condução, dependendo da orientação dos corpos na secção de solo considerada.

De um modo geral, para todas as disposições, a coincidência entre os modelos é maior para a geometria *offset* do que para a geometria em *central loop*. O facto de para a geometria *offset* existir apenas um *loop*, apesar de maior, e vários receptores progressivamente mais distantes desse *loop*, leva a que o campo que se difunde, ao longo da secção de solo, seja progressivamente mais suave, não havendo tantas variações. Este factor evita que sejam cometidos tantos erros numéricos não influenciando o cálculo dos valores de resistividade aparente.

O erro cometido, em valores absolutos, na comparação dos modelos varia entre 13.18% e 34.48%, para a disposição horizontal, 0.92% e 48.77%, para a disposição vertical e 1.52% e 49.76%, para a disposição diagonal. Todos os modelos estudados ao longo deste trabalho, apresentam valores de erro que se enquadram dentro do valor encontrado no capítulo 4, com excepção dos modelos cujas estruturas condutoras são ascendentes. O facto de as estruturas condutoras se aproximarem progressivamente da superfície do solo, leva a que o campo magnético que chega aos receptores tenha uma variabilidade maior o que propencia os erros numéricos no cálculo dos valores de resistividade aparente para estes modelos.

7.2 Caso Prático

Tendo em conta os resultados apresentados no capítulo 6.3, verifica-se que, de um modo geral, não é possível encontrar um bom ajuste entre as curvas reais e as curvas de dados sintéticos geradas a partir dos modelos criados. O número de tentativas realizadas para encontrar um bom ajuste entre as curvas foi muito alargado e não foi possível encontrar um modelo que fizesse um ajuste aceitável às 6 sondagens que foram tidas em conta. Na realidade, os dois modelos apresentados foram os dois modelos em que foi possível fazer um ajuste aceitável ao maior número de curvas (3), e onde a diferença para as restantes fosse menor.

Foram feitos alguns testes com modelos homogéneos e o que se verificou foi que mesmo para esses casos, onde as curvas deveriam tender para o valor de resistividade do meio, a partir de um dado intervalo de tempo (sensivelmente 35 μ s), os valores de resistividade aparente calculados estavam camuflados pelo erro numérico. O intervalo de tempo a partir do qual se verificou este fenómeno corresponde ao intervalo de tempo para o qual os valores de fluxo magnético eram inferiores a 10^{-11} V/m², valores esses demasiado pequenos.

Ora, tendo em conta estes factores, a razão fundamental pela qual não foi possível um melhor ajuste das curvas estará relacionada com o facto de o erro numérico cometido no cálculo dos valores de resistividade se sobrepor aos valores que deveriam ser calculados. O método numérico faz o cálculo dos valores com precisão simples quando, para valores tão pequenos de fluxo magnético, necessitaria de precisão dupla. Isto implica que, se os valores de fluxo magnético são muito baixos, o erro numérico associado ao cálculo dos valores de resistividade aparente é muito elevado não sendo possível, independentemente do modelo testado, obter valores coerentes com os colocados nos blocos do modelo gerado.

A razão pela qual os valores de fluxo magnético são tão baixos, poderá estar associado ao facto de os *loops* transmissores serem de comprimento muito baixo. Isto porque o método numérico tem definido como corrente de injeção 1 A. Ora, este valor deverá ser compensado com a área ocupada pelo *loop* transmissor para que o campo electromagnético gerado tenha intensidade suficiente para gerar uma boa resposta da secção de solo. Tal não foi possível neste caso, visto que aumentar o tamanho do *loop* seria estar a fugir às características em que os dados foram recolhidos.

Apesar de não se ter obtido um ajuste de boa qualidade, os modelos obtidos apresentam as características gerais que foram descritas nos capítulos 6.1 e 6.2. O lado esquerdo do modelo, correspondente à zona Sul da recolha de dados, é uma zona com altos valores de resistividade havendo depois uma descida progressiva desses valores para Norte, sendo que no extremo Norte (direita do modelo) as características do modelo são completamente distintas, tendo valores de resistividade muito mais baixos. Este tipo de descrição encontra correspondência na descrição da zona e que foi feita nos capítulos 6.1 e 6.2. Para além disso, é possível identificar uma estrutura anisotrópica com disposição diagonal, entre a estrutura resistiva mais à esquerda e a estrutura mais central do modelo. Esta estrutura anisotrópica tem valores de resistividade significativamente mais baixos que as estruturas vizinhas e correspondem, em localização, à zona de falha identificada. Assim, os modelos gerados permitiram analisar as características gerais da secção de solo estudada, e mostram o potencial do método na identificação de estruturas anisotrópicas presentes.

8. Conclusões

Do ponto de vista da identificação de corpos anisotrópicos numa dada secção de solo, conclui-se que o método aplicado é eficiente visto que foi possível, em todos os modelos testados, verificar diferenças acentuadas nos valores de resistividade aparente aquando da existência de um corpo anisotrópico.

Conclui-se também que, para além de haver uma variação acentuada nos valores de resistividade aparente, aquando da existência de corpos condutores ou resistivos, é possível identificar a orientação do corpo anisotrópico na secção de solo, por comparação com modelos com valores de resistividade teóricos calculados para modelos anisotrópicos. Os valores de resistividade do modelo que contém 1 ou vários corpos anisotrópicos, apresenta valores que se aproximam de forma adequada aos valores de resistividade efectiva longitudinal ou transversal, consoante a orientação do corpo na secção do solo.

É também possível fazer a localização horizontal e estimação da dimensão do corpo, ou conjunto de corpos, na secção de solo. Isto porque os sites que se localizam por cima das estruturas condutoras apresentam valores de resistividade efectiva menores que os sites que estão fora das estruturas condutoras.

Ambas as geometrias testadas apresentam bons resultados na identificação da orientação, localização e estimação dos valores de resistividade efectiva dos corpos. No entanto, a geometria em *central loop*, por ter o transmissor e receptor acoplados, permite que os valores de resistividade e que a estima das dimensões horizontais dos corpos sejam determinados com maior precisão. Já do ponto de vista da localização dos corpos, a geometria em *offset* é mais adequada, pois o campo que se difunde é mais suave e sofre menos variações, beneficiando o contraste do valor de resistividade dos corpos com o valor de resistividade do meio.

O intervalo de tempos utilizado deve ser ajustado à profundidade a que se encontram os corpos e à profundidade máxima que se pretende estudar. Isto porque, se se tiverem estruturas com contraste de resistividade a profundidades mais elevadas do que as utilizadas neste trabalho (superiores a 100 m), o campo electromagnético não tem tempo de se difundir até aos corpos existentes, reduzindo assim o número de dados que é possível recolher.

Do ponto de vista do contraste de resistividades, conclui-se que o método funciona muito bem quando o contraste de resistividade entre o meio e os corpos é elevado. Quando é este o caso, a gama de resistividades que é possível abranger é igualmente elevada. No entanto, caso o contraste baixe para a ordem de 1:100, os resultados já apresentam bastantes erros numéricos e a gama de resistividade possível também diminui.

A aplicação do método a dados reais, permite concluir que é possível obter a partir do ajuste das curvas reais com as curvas sintéticas as características gerais existentes na secção de solo e, a cima de tudo, a identificação e localização de estruturas anisotrópicas – objectivo fundamental deste trabalho. No entanto, para tal, é necessário fazer diversas tentativas.

O método demonstra ser menos eficiente quando se colocam intervalos de tempo maiores, posto que o tempo que demora a fazer o cálculo dos valores é muito superior. Para além disso, permite concluir que o método numérico precisará de algumas melhorias a nível de precisão no cálculo dos valores, no valor de intensidade de corrente injectada e na relação desta com o tamanho do *loop*.

9. Referências

- Almeida, E. R. (2011), *Caracterização geoeleétrica na região de Bebedouro-SP por meio de sondagens eletromagnéticas no domínio do tempo (TDEM)*, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Geofísica, 11-31
- Birtwistle, G. M., 1968, The explicit solution of the equation of heat conduction: *Comput. J.*, v. 11, p. 317
- Bortolozo, C. A. (2011), *Inversão conjunta 1D de dados SEV e TDEM: Aplicações em hidrogeologia*, Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Geofísica, 14-57
- Braga, A. C. (2007), *Módulo: Métodos Geoeletricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas*, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia Aplicada, 3-5 e 11-32
- Butler, D. K. (Ed), Fitterman, D. V. e Labson, V. F., *Near-Surface Geophysics - Electromagnetic Induction Methods for Environmental Problems*, Society of Exploration Geophysicists, 2º Edition (2005), 301-351
- DuFort, E. C.. and Frankel. S. P.. 1953. Stability conditions in the numerical treatment of parabolic differential equations: *Math. Tables and Other Aids to Comput.* (former title of *Mathematics of Computation*), v. 7, p. 135-152.
- Hohmann, G. W. e Oristaglio, M. L. (Julho, 1984), Diffusion of electromagnetic fields into a two-dimensional earth: A finite-difference approach, *Geophysics*, Vol. 49, NO. 7, 870-894
- Hohmann, G. W. e Wang, T. (Junho, 1993), *A finite-difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling*, *Geophysics*, Vol. 58, NO.6, 797-809
- Kirsch, R. (Ed.), Christiansen, A. V., Auken, E. e Sorensen, K., *The transient electromagnetic method, Groundwater Geophysics: A tool for Hydrogeology*, Springer, 2º Edition (2006), 179-225
- Monteiro Santos, F. (2006), *Propriedades Eléctricas das Rochas*, *Prospecção Geofísica I*, Cap.2
- Monteiro Santos, F. (2006), *Técnicas para investigação de estruturas superficiais – Métodos Indutivos*, *Prospecção Geofísica I*, Cap. 4
- Monteiro Santos, F.; Perea, H.; Massoud, U.; Plancha, J. P.; Marques, J. e Cabral, J. (2009), *Using tensorial electrical resistivity survey to locate fault systems*, *Journal of Geophysics and Engineering*, Eng. **6**, pp. 390-400, doi:10.1088/1742-2132/6/4/007
- Potter, D. (1973), *Computational physics: New York*, John Wiley and Sons
- Richtmyer, R. D., and Morton, K. W. (1967), *Difference methods for initial value problems: New York*, John Wiley and Sons, 2nd ed.
- Wolf, K. B. (1979), *Integral transforms in science and engineering: New York*, Plenum Press

10. Anexos

10.1 Anexos A – Tabelas

Tabela A1 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria *central loop*, com corpos dispostos horizontalmente

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci,ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx/Rx	Posição dos loops (nli, nlf / nIRx)
17HOR10D300L10C.txt	17 condutores	100, 130, 10, 43	300, 10	10	300	0.3	7	(75, 85, 80) (85, 95, 90) (100, 110, 105) (110, 120, 115) (120, 130, 125) (130, 140, 135) (145, 155, 150)
1HOR10D300L10Crom.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		9.4868		
1HOR10D300L10Crox.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		0.6182		
1HOR10D300L10Croz.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		145.5945		
7HORDOWN10D100L10C.txt	7 condutores	100, 140, 15, 28	100, 10	10		0.3000		
7HORDOWN10D100L10Crom.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	10		9.4868		
7HORDOWN10D100L10Crox.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	10		0.6493		
7HORDOWN10D100L10Croz.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	10		138.6116		
7HORUP10D100L10C.txt	7 condutores	100, 140, 28, 15	100, 10	10		0.3000		
7HORUP10D100L10Crom.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	10		9.4868		
7HORUP10D100L10Crox.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	10		0.6493		
7HORUP10D100L10Croz.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	10		138.6116		
10HORCR300L10C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 130, 10, 20	300, 10	0		0,3 / 3000		
1HORCR300L10Crom.txt	1 condutor	100, 130, 10, 20	300, 10	0		30.0000		
1HORCR300L10Crox.txt	1 condutor	100, 130, 10, 20	300, 10	0		0.5999		
1HORCR300L10Croz.txt	1 condutor	100, 130, 10, 20	300, 10	0		1500.2000		
HORCRDOWN100L10C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 140, 15, 28	100, 10	0		0,3 / 3000		
HORCRDOWN100L10Crom.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	0		30.0000		
HORCRDOWN100L10Crox.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	0		0.6500		
HORCRDOWN100L10Croz.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	0		1384.6116		
HORCRUP100L10C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 140, 28, 15	100, 10	0		0,3 / 3000		

	resistivos					
HORCRUP100L10Crom.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	0	30.0000	
HORCRUP100L10Crox.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	0	0.6500	
HORCRUP100L10Croz.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	0	1384.6116	

Tabela A2 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria *central loop*, com corpos dispostos verticalmente

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci,ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx/Rx	Posição dos loops (nli, nlf / nlRx)
20VERT10D10L300C.txt	20 condutores	100, 140, 10, 40	10, 300	10	300	0.3	7	(75, 85, 80) (85, 95, 90) (100, 110, 105) (110, 120, 115) (120, 130, 125) (130, 140, 135) (145, 155, 150)
1VERT10D10L300Crom.txt	1 condutor	100, 140, 10, 40	10, 300	10		9.4868		
1VERT10D10L300Crox.txt	1 condutor	100, 140, 10, 40	10, 300	10		150.1500		
1VERT10D10L300Croz.txt	1 condutor	100, 140, 10, 40	10, 300	10		0.5994		
7VERTDOWN10D10L100C.txt	7 condutores	100, 113, 10, 50	10, 100	10		0.3000		
7VERTDOWN10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	10		9.4868		
7VERTDOWN10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	10		138.6116		
7VERTDOWN10D10L100Croz.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	10		0.6493		
7VERTUP10D10L100C.txt	7 condutores	113, 100, 10, 50	10, 100	10		0.3000		
7VERTUP10D10L100Crom.txt	1 condutor	113, 100, 10, 50	10, 100	10		9.4868		
7VERTUP10D10L100Crox.txt	1 condutor	113, 100, 10, 50	10, 100	10		138.6116		
7VERTUP10D10L100Croz.txt	1 condutor	113, 100, 10, 50	10, 100	10		0.6493		
10VERTCR10L300C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 110, 10, 40	10, 300	0		0,3 / 3000		
1VERTCR10L300Crom.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		30.0000		
1VERTCR10L300Crox.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		1500.2000		
1VERTCR10L300Croz.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		0.5999		
VERTCRDOWN10L100C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 113, 10, 50	10, 100	0		0,3 / 3000		
VERTCRDOWN10L100Crom.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	0		30.0000		
VERTCRDOWN10L100Crox.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	0		1384.6616		
VERTCRDOWN10L100Croz.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	0		0.6500		

		10, 50					
VERTCRUP10L100C.txt	5 condutores e 5 resistivos	113,100, 10, 50	10, 100	0		0,3 / 3000	
VERTCRUP10L100Crom.txt	1 condutor	113,100, 10, 50	10, 100	0		30.0000	
VERTCRUP10L100Crox.txt	1 condutor	113,100, 10, 50	10, 100	0		1384.6616	
VERTCRUP10L100Croz.txt	1 condutor	113,100, 10, 50	10, 100	0		0.6500	

Tabela A3 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria *central loop*, com corpos dispostos na diagonal

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci, ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx/Rx	Posição dos loops (nli, nlf / nlRx)
5DIAG10D10L100C.txt	5 condutores	100,118, 10, 20	100, 10	10	300	0.3	7	(75, 85, 80) (85, 95, 90) (100, 110, 105) (110, 120, 115) (120, 130, 125) (130, 140, 135) (145, 155, 150)
5DIAG10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		9.4868		
5DIAG10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		133.4867		
5DIAG10D10L10Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		0.6742		
5DIAGDOWN10D10L100C.txt	5 condutores	100, 118, 10, 40	100, 10	10		0.3000		
5DIAGDOWN10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		9.4868		
5DIAGDOWN10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		133.4867		
5DIAGDOWN10D10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		0.6742		
5DIAGUP10D10L100C.txt	5 condutores	100, 118, 40, 10	100, 10	10		0.3		
5DIAGUP10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		9.4868		
5DIAGUP10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		133.4867		
5DIAGUP10D10L100Croz.txt	1 condutor	100,118, 40, 10	100, 10	0		0.6742		
CRDIAG10L100C.txt	5 condutores e 4 resistivos	100, 118, 10,20	100, 10	0		0,3 / 3000		
CRDIAG10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		30.0000		
CRDIAG10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		1333.3667		
CRDIAG10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		0.6750		
CRDIAGDOWN10L100C.txt	5 condutores e 4 resistivos	100, 118, 10, 40	100, 10	0		0,3 / 3000		
CRDIAGDOWN10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		30.0000		
CRDIAGDOWN10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		1333.3667		

CRDIAGDOWN10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		0.6750		
CRDIAGUP10L100C.txt	5 condutores e 4 resistivos	100, 118, 40, 10	100, 10	0		0,3 / 3000		
CRDIAGUP10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		30.0000		
CRDIAGUP10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		1333.3667		
CRDIAGUP10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		0.6750		

Tabela A4 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria *offset*, com corpos dispostos horizontalmente

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci,ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx/Rx	Posição de Tx (nli, nlf) e Rx (nl)
15RX17HOR10D300L10C.txt	17 condutores	100, 130, 10, 43	300, 10	10	300	0.3	1 (500m) / 15	(40, 90) 85 90 93 96 99 102 105 110 115 120 125 130 135 140 145
15RX1HOR10D300L10Crom.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		9.4868		
15RX1HOR10D300L10Crox.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		0.6182		
15RX1HOR10D300L10Croz.txt	1 condutor	100, 130, 10, 43	300, 10	10		145.5945		
15RX7HORDOWN10D100L10C.txt	7 condutores	100, 140, 15, 28	100, 10	10		0.3000		
15RX7HORDOWN10D100L10Crom.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	10		9.4868		
15RX7HORDOWN10D100L10Crox.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	10		0.6493		
15RX7HORDOWN10D100L10Croz.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	10		138.6116		
15RX7HORUP10D100L10C.txt	7 condutores	100, 140, 28, 15	100, 10	10		0.3000		
15RX7HORUP10D100L10Crom.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	10		9.4868		
15RX7HORUP10D100L10Crox.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	10		0.6493		
15RX7HORUP10D100L10Croz.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	10		138.6116		
15RX10HORCR300L10C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 130, 10, 20	300, 10	0		0,3 / 3000		
15RX1HORCR300L10Crom.txt	1 condutor	100, 130, 10, 20	300, 10	0		30.0000		
15RX1HORCR300L10Crox.txt	1 condutor	100, 130, 10, 20	300, 10	0		0.5999		
15RX1HORCR300L10Croz.txt	1 condutor	100, 130, 10, 20	300, 10	0		1500.2000		
15RXHORCRDOWN100L10C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 140, 15, 28	100, 10	0		0,3 / 3000		
15RXHORCRDOWN100L10Crom.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	0		30.0000		

15RXHORCRDOWN100L10Crox.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	0	300	0.6500	1	(500m) / 15
15RXHORCRDOWN100L10Croz.txt	1 condutor	100, 140, 15, 28	100, 10	0		1384.6116		
15RXHORCRUP100L10C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 140, 28, 15	100, 10	0		0,3 / 3000		
15RXHORCRUP100L10Crom.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	0		30.0000		
15RXHORCRUP100L10Crox.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	0		0.6500		
15RXHORCRUP100L10Croz.txt	1 condutor	100, 140, 28, 15	100, 10	0		1384.6116		

Tabela A5 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria *offset*, com corpos dispostos verticalmente

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci,ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx/Rx	Posição de Tx (nli, nlf) e Rx (nl)
15RX20VERT10D10L300C.txt	20 condutores	100, 140, 10, 40	10, 300	10	300	0.3	1 (500m) / 15	(40, 90) 85 90 93 96 99 102 105 110 115 120 125 130 135 140 145
15RX1VERT10D10L300Crom.txt	1 condutor	100, 140, 10, 40	10, 300	10		9.4868		
15RX1VERT10D10L300Crox.txt	1 condutor	100, 140, 10, 40	10, 300	10		150.1500		
15RX1VERT10D10L300Croz.txt	1 condutor	100, 140, 10, 40	10, 300	10		0.5994		
15RX7VERTDOWN10D10L100C.txt	7 condutores	100, 113, 10, 50	10, 100	10		0.3000		
15RX7VERTDOWN10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	10		9.4868		
15RX7VERTDOWN10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	10		138.6116		
15RX7VERTDOWN10D10L100Croz.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	10		0.6493		
15RX7VERTUP10D10L100C.txt	7 condutores	113, 100, 10, 50	10, 100	10		0.3000		
15RX7VERTUP10D10L100Crom.txt	1 condutor	113, 100, 10, 50	10, 100	10		9.4868		
15RX7VERTUP10D10L100Crox.txt	1 condutor	113, 100, 10, 50	10, 100	10		138.6116		
15RX7VERTUP10D10L100Croz.txt	1 condutor	113, 100, 10, 50	10, 100	10		0.6493		
15RX10VERTCR10L300C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 110, 10, 40	10, 300	0		0,3 / 3000		
15RX1VERTCR10L300Crom.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		30.0000		
15RX1VERTCR10L300Crox.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		1500.2000		
15RX1VERTCR10L300Croz.txt	1 condutor	100, 110, 10, 40	10, 300	0		0.5999		
15RXVERTCRDOWN10L100C.txt	5 condutores e 5 resistivos	100, 113, 10, 50	10, 100	0		0,3 / 3000		

15RXVERTCRDOWN10L100Crom.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	0		30.0000		
15RXVERTCRDOWN10L100Crox.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	0		1384.6616		
15RXVERTCRDOWN10L100Croz.txt	1 condutor	100, 113, 10, 50	10, 100	0		0.6500		
15RXVERTCRUP10L100C.txt	5 condutores e 5 resistivos	113,100, 10, 50	10, 100	0		0,3 / 3000		
15RXVERTCRUP10L100Crom.txt	1 condutor	113,100, 10, 50	10, 100	0		30.0000		
15RXVERTCRUP10L100Crox.txt	1 condutor	113,100, 10, 50	10, 100	0		1384.6616		
15RXVERTCRUP10L100Croz.txt	1 condutor	113,100, 10, 50	10, 100	0		0.6500		

Tabela A6 – Características de todos os modelos gerados, para a geometria *offset*, com corpos dispostos na diagonal

Nome do ficheiro	Nº de condutores / resistivos	Posição dos condutores / resistivos (nli,nlf,nci,ncf)	Dimensões dos condutores / resistivos (m) (x, z)	Distância entre condutores (m)	ρ (Ω .m) meio	ρ (Ω .m) condutores / resistivos	Nº de Tx/Rx	Posição de Tx (nli, nlf) e Rx (nl)
15RX5DIAG10D10L100C.txt	5 condutores	100,118, 10, 20	100, 10	10	300	0.3	1 (500m) / 15	(40, 90) 85 90 93 96 99 102 105 110 115 120 125 130 135 140 145
15RX5DIAG10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		9.4868		
15RX5DIAG10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		133.4867		
15RX5DIAG10D10L10Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		0.6742		
15RX5DIAGDOWN10D10L100C.txt	5 condutores	100, 118, 10, 40	100, 10	10		0.3000		
15RX5DIAGDOWN10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		9.4868		
15RX5DIAGDOWN10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		133.4867		
15RX5DIAGDOWN10D10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0		0.6742		
15RX5DIAGUP10D10L100C.txt	5 condutores	100, 118, 40, 10	100, 10	10		0.3		
15RX5DIAGUP10D10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		9.4868		
15RX5DIAGUP10D10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0		133.4867		
15RX5DIAGUP10D10L100Croz.txt	1 condutor	100,118, 40, 10	100, 10	0		0.6742		
15RXCRDIAG10L100C.txt	5 condutores e 4 resistivos	100, 118, 10,20	100, 10	0		0,3 / 3000		
15RXCRDIAG10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		30.0000		
15RXCRDIAG10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		1333.3667		
15RXCRDIAG10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 20	100, 10	0		0.6750		

15RXCRDIAGDOWN10L100C.txt	5 condutores e 4 resistivos	100, 118, 10, 40	100, 10	0	0,3 / 3000	30.0000	1333.3667	0.6750
15RXCRDIAGDOWN10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0				
15RXCRDIAGDOWN10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0				
15RXCRDIAGDOWN10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 10, 40	100, 10	0				
15RXCRDIAGUP10L100C.txt	5 condutores e 4 resistivos	100, 118, 40, 10	100, 10	0				
15RXCRDIAGUP10L100Crom.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0				
15RXCRDIAGUP10L100Crox.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0				
15RXCRDIAGUP10L100Croz.txt	1 condutor	100, 118, 40, 10	100, 10	0				

Tabela A7 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos apresentados na figura 12 e tabela 3, para a geometria *offset*.

MÉDIAS A CADA TEMPO			
Tempo (s)	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
0.00700	0.00	0.00	0.00
0.01000	-0.03	0.00	-0.19
0.03000	21.51	0.15	-16.73
0.15000	76.71	11.40	57.88
0.47500	89.27	36.88	-273.60
1.62500	411.16	15.46	-1253.23
5.02500	379.79	79.42	-2600.28
10.22000	197.55	49.87	-5142.48
20.00000	-3245.13	143.85	-10780.50

Tabela A8 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos apresentados na figura 12 e tabela 3, para a geometria *offset*.

MÉDIAS SITE A SITE			
SITE	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
1	692.65	38.45	7361.76
2	834.77	42.38	8404.22
3	828.15	42.56	8693.32
4	797.91	40.73	8230.40
5	635.39	30.84	6533.94
6	300.15	-6.92	3240.57
7	-395.20	4.72	-788.95
8	-2010.93	136.24	-7885.05
9	-14131.77	67.02	-12160.72
10	4844.70	48.00	-13504.42

11	1775.07	36.23	-11712.18
12	978.30	27.91	-10025.13
13	628.07	21.70	-8092.48
14	442.11	17.36	-6437.93
15	331.99	14.48	-5205.90

Tabela A9 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos apresentados na figura 14 e tabela 6, para a geometria *offset*.

MÉDIAS A CADA TEMPO			
Tempo (s)	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
0.00700	0.00	0.00	0.00
0.01000	-0.04	-0.23	0.01
0.03000	-19.94	-4.62	0.74
0.15000	27.26	80.69	7.70
0.47500	-358.10	-13.14	31.60
1.62500	-848.87	-470.32	7.07
5.02500	-4583.35	-694.41	35.20
10.22000	-5438.02	-1643.81	-10.42
20.00000	-12874.74	-7288.74	-12.73

Tabela A10 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos apresentados na figura 14 e tabela 6, para a geometria *offset*.

MÉDIAS SITE A SITE			
SITE	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
1	3712.39	5893.18	6.52
2	3956.76	6131.83	6.12
3	3983.27	6004.19	5.35
4	3683.46	5350.20	3.44
5	2885.20	3978.77	-1.65
6	1372.26	1701.64	30.36
7	-591.75	-580.95	-1.29
8	-5475.55	-4455.19	10.41
9	-10181.93	-6328.13	5.36
10	-6847.93	-6723.92	4.58
11	-7668.99	-6516.82	4.89
12	-7628.48	-6208.98	5.45
13	-7376.50	-5094.32	5.98
14	-7102.30	-5082.78	6.41
15	-6879.56	-4793.03	6.72

Tabela A11 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos à direita na figura 16, para a geometria *offset*

MÉDIAS SITE A SITE			
SITE	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
1	29.05	502.58	-49.18
2	-96.94	555.59	-91.13
3	31.92	577.88	-61.80
4	41.20	599.02	-59.95
5	50.28	605.28	-60.13
6	122.24	572.98	-86.11
7	163.69	615.15	-135.67
8	-2433.19	389.99	-76.02
9	-99.48	8.36	-61.13
10	24.99	-448.58	-53.89
11	53.09	-734.04	-49.59
12	52.61	-813.88	-47.78
13	45.56	-800.84	-46.57
14	38.36	-759.58	-45.29
15	32.11	-715.02	-44.07

Tabela A12 – Comparação, em percentagem e para cada receptor (SITE), dos modelos à esquerda na figura 16, para a geometria *offset*

MÉDIAS SITE A SITE			
SITE	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
1	510.70	3615.73	6.06
2	561.59	3818.83	-2.49
3	550.25	3736.81	-0.49
4	501.85	3255.19	-6.97
5	352.41	2202.05	-26.33
6	127.51	541.61	12.58
7	-459.67	-954.76	217.43
8	19417.28	-3321.76	57.19
9	1727.05	-4426.60	6.21
10	877.79	-13599.03	0.09
11	636.69	-4132.60	1.12
12	525.27	-3917.20	3.90
13	459.55	-3631.28	7.16
14	415.35	-3367.30	10.07
15	382.83	-3147.77	12.18

Tabela A13 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos à direita na figura 16, para a geometria *offset*

MÉDIAS A CADA TEMPO			
Tempo (s)	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
0.00700	0.00	0.00	0.00
0.01000	0.15	0.03	0.18
0.03000	-72.21	0.31	-11.99
0.15000	-49.23	-66.63	-67.04
0.47500	-73.68	32.53	-122.65
1.62500	-5.27	-79.09	-76.98
5.02500	101.52	70.76	-129.42
10.22000	273.69	134.46	-84.53
20.00000	-1341.68	0.57	-88.56

Tabela A14 – Comparação, em percentagem e para cada tempo, dos modelos à esquerda na figura 16, para a geometria *offset*

MÉDIAS A CADA TEMPO			
Tempo (s)	$\rho_a / \rho_a(\text{médio})$ (%)	$\rho_a / \rho_a(x)$ (%)	$\rho_a / \rho_a(z)$ (%)
0.00700	0.00	0.00	0.00
0.01000	0.06	-0.06	0.09
0.03000	11.14	-8.40	4.10
0.15000	84.75	76.95	18.03
0.47500	82.34	-5566.68	59.82
1.62500	-0.72	-968.77	-13.83
5.02500	41.31	-1543.62	130.05
10.22000	-67.80	-2294.36	-20.78
20.00000	15800.79	-3691.90	1.17

10.2 Anexos B – Figuras

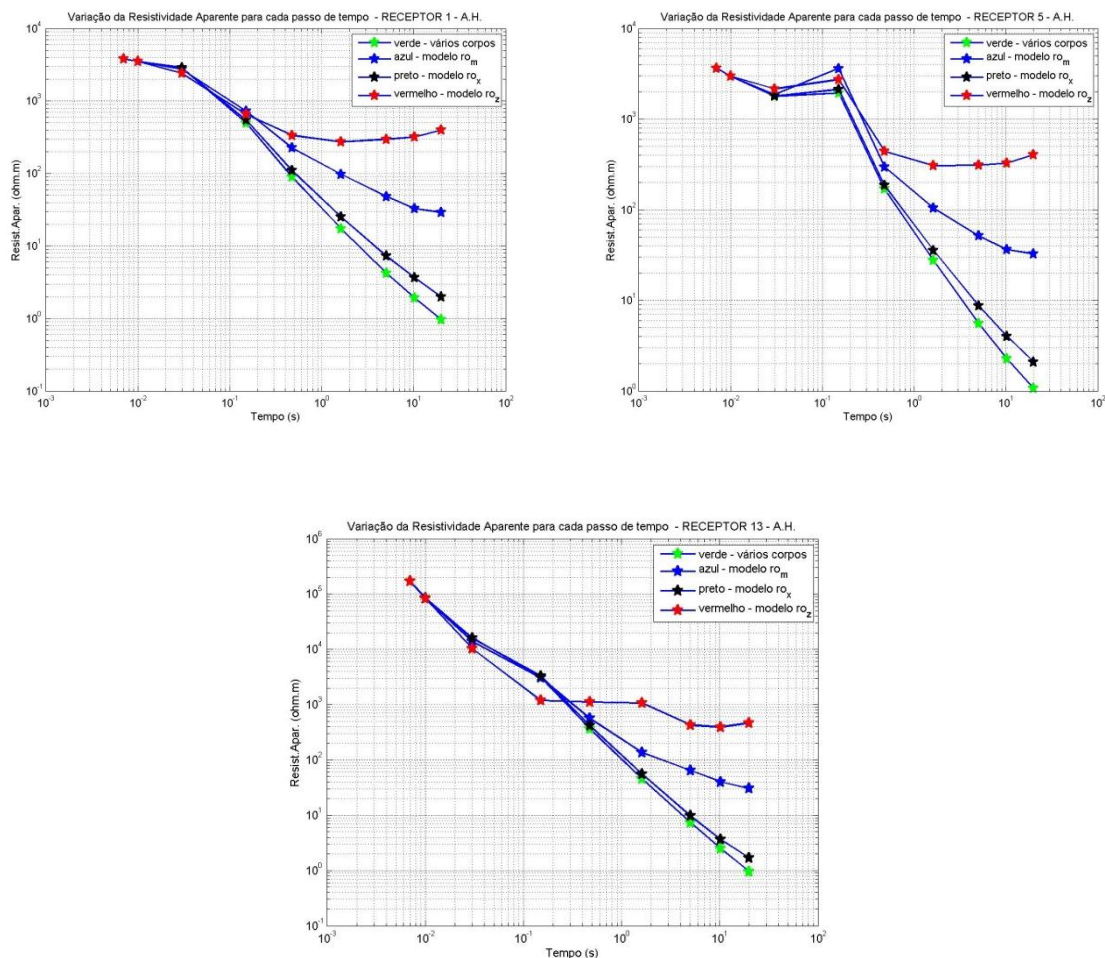


Fig. B1 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s), para os modelos apresentados na figura 12, geometria de offset. Canto superior esquerdo – Site 1 (antes das estruturas condutoras); Canto superior direito – Site 5 (início das estruturas condutoras); base – Site 13 (após as estruturas condutoras)

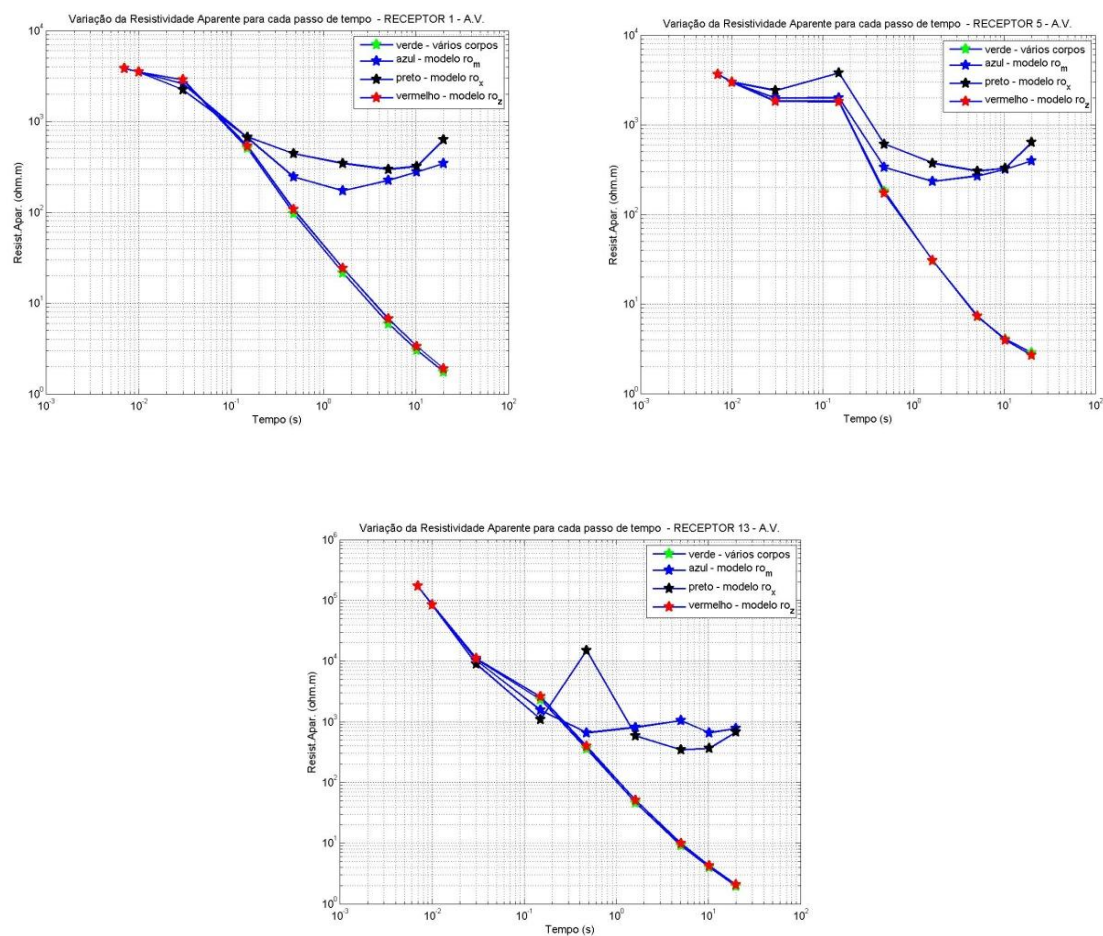


Fig. B2 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s) para os modelos apresentados na figura 15, para uma geometria *offset*. Canto superior esquerdo – Site 1 (antes das estruturas condutoras); Canto superior direito – Site 5 (início das estruturas condutoras); Canto inferior direito – Site 13 (após as estruturas condutoras)

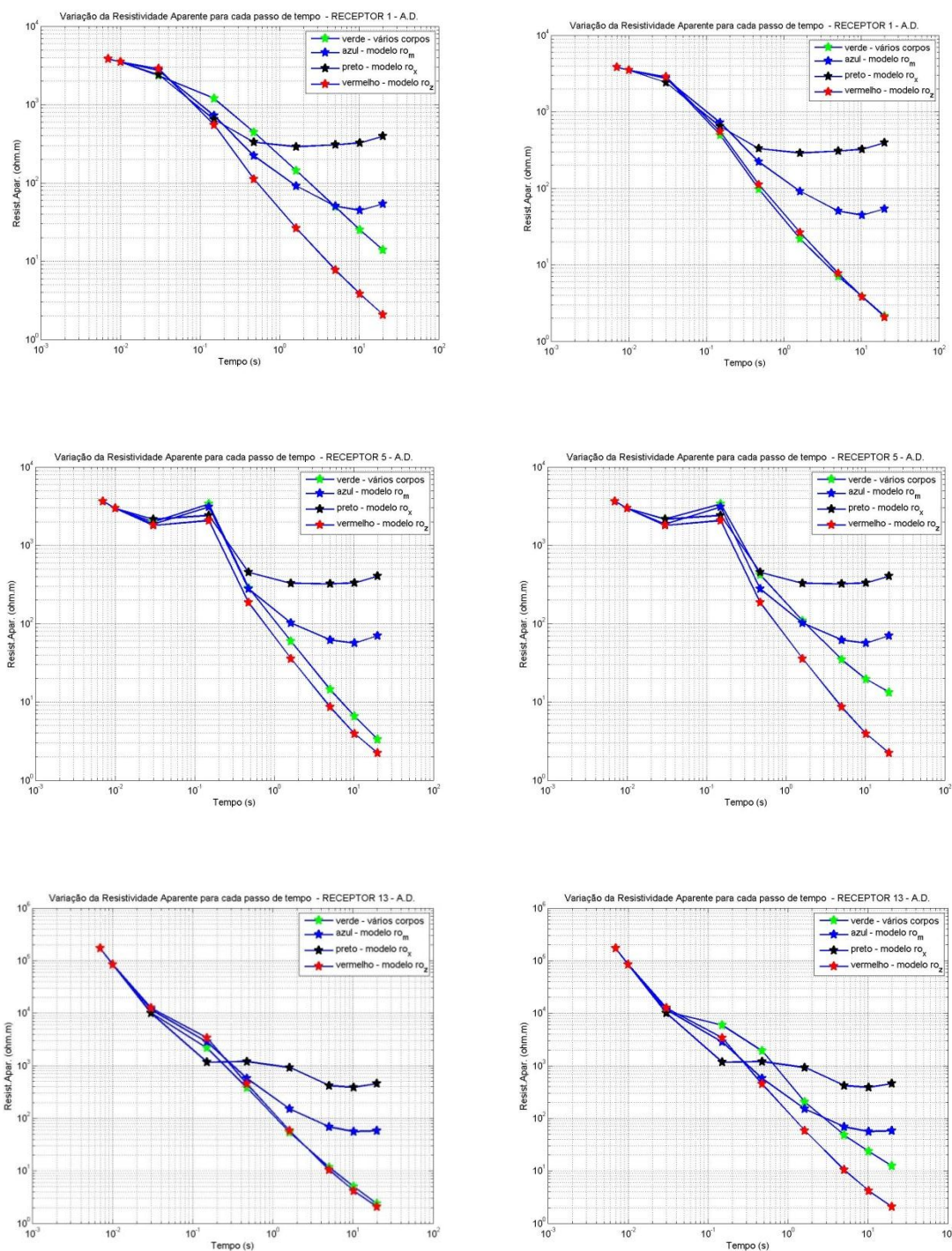


Fig. B3 – Resistividade aparente ($\Omega.m$) em função do tempo (s) para os sites 1, 5 e 13, dos modelos com disposição diagonal e com variação da profundidade dos corpos condutores apresentados na figura 17. Esquerda, de cima para baixo – Site 1, 5 e 13 para modelos com condutores progressivamente mais profundos; Direita, de cima para baixo – Site 1, 5 e 13 para modelos com condutores progressivamente mais superficiais, para uma geometria *offset*